

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : SCIENCE & TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

N° :



DOMAINE : TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : PRODUCTIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : AOUFI BELKACEM

Intitulé

**Comportement à la fatigue d'un acier au
carbone après traitement thermique**

Soutenu devant le jury composé de :

Makri Hocine	Enseignant	Université : M'sila	Président
Douib Nadir	Enseignant	Université : M'sila	Rapporteur
Debih Ali	Enseignant	Université : M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017



Remerciements

*Tout d'abord, louange à « Allah » qui m'a guidé sur le droit chemin
Tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes reflexes
Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti. Qu'il me soit permis ici
De dire ma gratitude à ceux qui m'ont donné beaucoup de soin
À l'élaboration de ce modeste travail et m'ont guidé sur le bon chemin,
En espérant que ce mémoire soit le reflet de la bonne formation que j'ai reçu.*

*Je tiens à remercier vivement mon encadreur Douibe Nadir
Pour le soutien et l'aide qu'il n'a jamais manqué de m'apporter,
Et mes vifs remerciements vont aussi mes amis :*

Mustapha, Latifa, Saleh, Mohamed, Khaled, Mourad, Abdou, Fayçal

*Et Mes amis dans le laboratoire génie
Mécanique et Mes amis dans le hall technologie
À mes attentes ; qu'elles trouvent ici l'expression de
Mon amitié et sympathie.*

*Je tiens à remercier chaleureusement, tous mes proches
Et tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté leurs sollicitudes pour accomplir
Ce Travail.*



AOUFI BELKACEM

REMERCIEMENTS

A Mon Encadreur

Mr Douib Nadir

Votre compétence, votre encadrement ont toujours suscité mon profond respect.

Je vous remercie pour votre accueil et vos conseils.

Veillez trouver ici, l'expression de mes gratitude et de ma grande estime.

Aux membres du jury

Président du Jury : Makri Hocine

Examineur : Debih ali

Messieurs les jurys, vous nous faites un grand honneur

en acceptant de juger ce travail.

Je dois un remerciement à tous les enseignants de Département de Génie

Mécanique

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A ma chère mère, et mon cher oncle Mohamed, pour tout

Le mal qu'ils se sont donnés afin de me faciliter ma tâche

À ma femme pour son soutien aux moments difficiles

De mon travail et surtout pour sa patience,

A Mes enfants

Ali –Douaa –Mohamed

À mes camarades de classe

*A tous **mes amies** dans les laboratoires de *hal* technologies*

AOUFI
BELKACEM



Table de matières

Introduction générale

Notations principales

CHAPITRE 1

Effet de traitement thermique sur le comportement
d'aciers

HISTORIQUE DES TRAITEMENTS THERMIQUES.....	1
1 : EFFET DE TRAITEMENT THERMIQUE SUR LE COMPORTEMENT DES ACIERS	2
1 :1 INTRODUCTION	2
1.2 Alliages ferreux :.....	2
1.3 Influence des éléments alphagènes et gammagènes.....	4
1.3.1 Les éléments gammagènes :.....	4
1.3.2 Les éléments alphagènes :.....	4
1.4 Diagrammes de phases fer - carbone:	5
1.4.1 La ferrite α :.....	7
1.4.2 L'austénite γ :.....	7
1.4.3 La cémentite : Fe_3C	7
1.4.4 La perlite :	8
1.5 Les aciers :	9
1.5.1 Les aciers au carbone	9
1.5.2 Acier faiblement alliés :	9
1.6 Influence des éléments d'addition sur les propriétés des aciers :.....	10
1.6.1 Influence spécifique des éléments d'addition	10
1.6.2 Le carbone.....	10
1.6.3 Le chrome	10
1.6.4 Le nickel.....	10
1.6.5 Le molybdène.....	10
1.6.6 Le silicium.....	11
1.6.7 Le niobium	11

TABLE DE MATIERES

1.6.8Le titane.....	11
1.6.9Le manganèse.....	11
1.6.10 Le cuivre	12
1.6.11Le soufre	12
1.6.12 le vanadium	12
1.6.13 le zirconium.....	12
1.7 Définitions et procédés des traitements thermiques :.....	13
1.7.1L'austénitisation :	13
1.7.2La Trempe :	13
a)Trempe à l'eau :	14
b) Trempe à l'huile :	14
c)Trempe à l'air :	15
1.7.3 Le revenu :	18
1.8Les transformations de phases à l'état solide des aciers :	20
1.8.1La transformation de l'austénite :.....	20
1.8.2Transformation perlitique :	20
1.8.3transformation intermédiaire bainitique :	21
Définition	21
1.8.4 La transformation bainitique :	21
1.8.5 Transformation martensitique :	22
Définition:	22
1.8.6 La transformation martensitique :	22
1.8.7 La martensite	24
1.8.8 Propriétés des aciers martensitiques.....	24
1.8.9 Revenu de la martensite	26

CHAPITRE 2

PROPRIETES DE FATIGUE

2 Introduction.....	27
2.1 Courbe de S.N	28
2.1.1 Effet de la concentration de contraintes sur la fatigue :	30
2.1.2 Effet de la taille	30
2.1.2.1 Coefficient théorique de concentration de contraintes K_t	30
2.1.2.2 Relation entre le facteur de concentration de contrainte et le facteur de concentration de contrainte en fatigue :	32
2.1.3 Effet de la surface sur la fatigue.....	32
2.2 Théorie statique de la fatigue des métaux	33
2.2.1 Fatigue et endurance	33
Définitions :.....	33
2.2.2 Limite de fatigue	33
2.2.3 Limite d'endurance	33
2.2.4 Durée de vie	34
2.2.5 Contraintes appliquées	34
2.2.6 Contrainte nominale	34
2.2.7 Cycle de contrainte.....	35
2.2.8 Types de cycles de contraintes	36
2.2.9 Diagrammes représentatifs.....	36
2.3 Fatigue oligocyclique.....	36
2.4 Propagation des fissures par fatigue :	37
Stade 1 :	37
Stade 2 :	37
Stade 3 :	39
2.5 Méthodes expérimentales.....	40
2.5.1 Courbes d'équiprobabilité de rupture	40
2.5.2 Diagramme de Haigh.....	40
2.5.3 Diagramme de Goodman-Smith.....	43
2.5.4 Diagramme de Roš.....	44
2.5.5 Diagramme de Moore-Kommers-Jasper.....	44

CHAPITRE 3

PROCEDES EXPERIMENTAUX

3.1 CHOIX DE L'ACIER.....	45
3.1.1 Composition chimique de l'acier	45
3.1.2 Moyen de détection.....	45
3.1.3 Composition chimique	45
3.2 Caractéristiques mécaniques	45
3.2.1 Les essais de traction.....	46
3.2.3 Conditions relatives à la température	46
3.2.4 Les éprouvettes.....	46
3.2.5 Résultats des essais	47
3.3 Machine d'essai de fatigue.....	51
3.3.1 Description de la machine.....	51
3.3.2 Instructions.....	53
3.3.3 Eprouvette d'essai	53
3.3.4 Forme	53
3.3.5 Dimensions.....	54
3.3.6 Usinage des éprouvettes.....	56
3.4 Contrainte maximale de flexion	58
3.5 Résultats expérimentaux.....	60
3.5.1 Lot n° : 01.....	60
3.5.2 Lot n° : 02	62
3.5.3 Lot n° : 03	64
3.6 Etude micrographique	66
3.7 Interprétation des résultats	70
3.7.1 Comportement de l'acier C45 à la traction	70
3.7.2 Comportement de l'acier C45 à la fatigue	70
3.7.3 Étude micrographique	71
Conclusion.....	72
BIBLIOGRAPHIE	74

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition [1].	4
Figure 1.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone. [1].	5
Figure 1.3 : (a) Martensite en lattes d'un acier à faible teneur en carbone ; (b) Martensite en plaques d'un acier à haute teneur en carbone (2)	7
Figure 1.4 : La maille quadratique centrée de la martensite en relation avec la maille C.F.C de l'austénite (2).	12
Figure 1.5(a) : Courbe TTT pour un acier eutectoïde [2].	15
Figure 1.5(b) : diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, dans le cas des trempes [1].	15
Figure 1.6 : Effet de température de revenu sur les propriétés d'un acier eutectoïde [2].	16
Figure 1.7 : Effet de la température de transformation sur les propriétés d'un acier eutectoïde [2].	18
Figure 1.8 Relation entre la teneur en carbone et les paramètres de la maille q.c de la martensite [2]	24
Figure 1.9 : Influence de la teneur en carbone sur la dureté des aciers martensitiques. [2]	25
Figure 2.1 : Rupture d'un fil d'acier sous l'effet d'une flexion cyclique [5].	27
Figure 2.2 : Allure de la courbe de Wöhler [3]	28
Figure 2.3.1 : abaques propres d'arbre plein au flexion [5].	30
Figure 2.3.2 :Abaques pour déterminer le facteur de concentration de contraintes en fatigue[5].	31
Figure 2.4 :cycle de contrainte sinusoïdale	34
Figure 2.5 :stades de propagation de fissure [4]	36
Figure 2.6 : loi de Paris [4].	37
Figure 2.7 :Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques)[3]	39
Figure 2.8 : Diagramme de Haigh [3]	40
Figure 2.9 : Différentes représentations de la courbe AB [3]	41
Figure 2.10 :Diagramme de Goodman-Smith (résultats théoriques) [3].	42
Figure 2.11 :Diagramme de Roš (résultats théoriques) [3]	43
Figure 2.12 :Diagramme de Moore-Kommers et Jasper [3]	44
Figure 3.1 :Test de rapport- matériau acier XC 48 laminée	49
Figure 3.2 :Courbe de traction (acier trempé à 803°C et revenu à 300°C)	50
Figure 3.3 :Eprouvette d'essai de traction réalisée sur solidworks	50
Figure 3.4 :mise en plan de l'éprouvette de traction	51

LISTE DES FIGURES

Figure 3.5 : La machine d'essai de fatigue GUNT WP 140	54
Figure 3.6 : Eprouvette d'essai de fatigue réalisée sur solidworks	56
Figure 3.7 : mise en plan d'éprouvette d'essai fatigue 3.3.6 Usinage des éprouvettes	58
Figure 3.7 : Rugosimètre	59
Figure 3.8 : tour universelle mode SN40C-50C	59
Figure 3.9 : Point d'application de la charge F	61
Figure 3.10 : Courbe S-N de l'acier XC 48 à l'état brut	63
Figure 3.11 : Courbe S-N de l'acier XC 48 trempées à $T = 803^{\circ}\text{C}$ puis revenues à $T = 300^{\circ}\text{C}$ suivit d'un refroidissement lent.	65
Figure 3.12 : Courbe S-N de l'acier XC trempées à $T = 803^{\circ}\text{C}$ puis revenues à $T = 450^{\circ}\text{C}$ suivit d'un refroidisse.	67
Figure 3.13 : Structure métallographique de l'acier XC48[8]	68
Figure 3.14 : Caractéristiques des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative [9]	68
Figure 3.15 : Faces de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 360 MPa après 36400 cycles (acier bru)	69
Figure 3.16 : Faces de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 360 MPa après 33000 cycles de l'acier XC 48 trempé et revenu à 300°C	70
Figure 3.17 : Faces d'arrachement de matière d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 300 MPa après 12000 cycles.	70
Figure 3.18 : Faces de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 200 MPa après 2000000 cycles de l'acier XC 48 trempé et revenu à 450°C	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: composition chimique de notre acier.....	45
Tableau 3.2 : Caractéristiques des éprouvettes de la machine WP 140	56
Tableau 3.3: résultats d'essai de fatigue à l'état brut.....	62
Tableau 3.4 : résultats d'essai de fatigue -revenus à $T=300^{\circ}\text{C}$	64
Tableau 3.4 : résultats d'essai de fatigue -revenus à $T=450^{\circ}\text{C}$	66

ANNEXE

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des faces de rupture en fatigue.....	77
Annexe 1 : Composition chimique de l'acier XC48	78
Annexe 3 : Montage de l'éprouvette pendant l'usinage.....	78
Annexe 4 : machine de traction.....	78
Annexe 5 : les éprouvettes de fatigue avant TT	78
Annexe 6 : four utilisé dans le traitement des éprouvettes	80
Annexe7 : éprouvette après TT	80
Annexe 8 :Analyse statique d'éprouvette de fatigue sur solidworks.....	81-86

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

La fatigue est définie comme étant la diminution de la résistance ou la défaillance d'un matériau due aux efforts répétitifs qui peuvent être supérieurs ou inférieurs à la limite élastique. Ce phénomène est souvent rencontré dans les pièces mécaniques qui travaillent en sollicitation tels que les pièces soumises aux fortes charges dans les voitures et les avions, dans les aubes de turbine, les ressorts, les vilebrequins et certains produits de consommation, tels que les chaussures, qui sont soumises en permanence à des contraintes répétitives (compression et tension).

Ces contraintes sont souvent inférieures à la limite élastique du matériau; cependant, lorsque ces contraintes se répètent plusieurs fois, cela entraîne la défaillance par fatigue. La possibilité d'une panne de fatigue est la principale raison pour laquelle les constituants de l'avion ont une durée de vie déterminée au préalable.

Les premières études systématiques de ce phénomène, furent effectuées en 1869 par l'ingénieur des chemins de fer bavarois A. Wöhler, dans le cadre de recherches sur la rupture des essieux de wagon. Il supposa que, comme dans un organisme vivant, la répétition de contraintes « fatiguait » le matériau en diminuant ses capacités de résistance. Cette idée ne correspond pas à la réalité physique, mais le terme est resté comme nom générique de ce phénomène.

De manière générale on estime qu'environ 80 % des ruptures en service sont dues à la fatigue. Les ruptures dues à la fatigue ont fait l'objet de recherches depuis longtemps afin de comprendre ce phénomène. La fatigue persiste même de nos jours à être un problème majeur en ingénierie.

En effet, les pièces mécaniques utilisées dans les différents systèmes et dispositifs soumises à des sollicitations mécaniques présentent des propriétés différentes.

Le phénomène de fatigue est un phénomène majeur qu'il faut tenir en compte lors de la conception d'une pièce ou d'une machine. La sensibilité à l'effet (de l'entaille) des défauts de fabrication et des inclusions est un facteur très important. Le type d'acier choisit pour être utilisé dans ce cas est primordial. La forme et l'état de surface des pièces sollicitées à travailler dans de telles conditions s'avèrent indispensable pour limiter l'influence des charges répétées sur la pièce, et par conséquent augmenter sa durée de vie.

INTRODUCTION

L'étude de la fatigue des matériaux fait toujours l'objet de nombreux travaux de recherche, particulièrement sur les métaux (10). Le problème physique de la fatigue est lié à la microgéométrie de la surface du matériau et à sa structure atomique même, et donc à sa composition chimique.

Pour notre cas on a choisi d'étudier l'effet de trempe et de revenu sur le comportement à la fatigue d'un acier au carbone de type XC48 (C45). On a jugé utile de faire cette étude dans le but de comprendre ce phénomène après traitement thermique.

Cette étude va compléter d'autres études qui ont été effectuées sur cet acier et qui nous ont permis d'optimiser le temps et la température de revenu aux basses températures. Ces données nous ont aidés à choisir le temps et la température de revenu utilisés dans cette étude. L'objectif primordial est d'arriver à tracer les courbes S-N dans les deux cas à étudier, trempe et revenu à $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ et trempe et revenu à $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'interprétation des résultats obtenus dans ces conditions constituent le premier objectif de notre étude.

Ce mémoire est composé de trois chapitres. Le premier expose l'effet des différents traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des aciers. Le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le comportement à la fatigue des différents matériaux et en particulier les matériaux ferreux. Le troisième chapitre présentera les procédés expérimentaux, ainsi que la discussion des résultats obtenus. Une conclusion générale va clôturer ce modeste travail.

Notations principales

Notations principales

Symbole	Désignation
E	Module d'élasticité ou module d'Young
ε	Déformation
F	Force
I	Moment d'inertie
K_f	Facteur effectif de concentration de contrainte
K_t	Facteur théorique de concentration de contrainte
M_f	Moment de flexion
v	distance de la fibre externe à la fibre neutre
N	Nombre de cycles à rupture
n	Nombre de cycles
q	Facteur de sensibilité à l'entaille
R_e	Limite d'élasticité
R_m	Résistance à la traction
R_σ	Rapport de contrainte
σ_{moy}	Contrainte moyenne
σ_a	Amplitude de la contrainte alternée
σ_{max}	Contrainte maximale
σ_{min}	Contrainte minimale
σ_D	Limite de fatigue
$\sigma_{D(N)}$	Limite d'endurance à N cycles

CHAPITRE 1

**Effet de traitement thermique sur le comportement des
aciers**

HISTORIQUE DES TRAITEMENTS THERMIQUES

L'utilisation des traitements thermiques pour améliorer la dureté et la résistance des alliages remonte à des temps reculés dans l'histoire. Les anciens obtenaient l'acier en combinant la matière première (minerai de fer) avec du charbon du bois qu'ils chauffaient dans de profonds creux creusés dans le sol. Ils obtenaient des alliages d'aciers très durs. Ils ne savaient pas pourquoi l'acier obtenu était aussi dur et fragile. Dans quelques régions du monde les forgerons ont pu obtenir des aciers durs mais pas fragile (aciers riches en d'autres éléments tels que le manganèse), mais ils ne savaient pas les causes derrière ces améliorations. Après le développement de la physique et l'invention des instruments de mesures, la compréhension des phénomènes de durcissement des alliages métalliques et de l'acier en particulier, la connaissance de leur composition chimique ; les spécialistes en métallurgie et en mécanique ont réussi à contrôler les différentes propriétés en contrôlant la structure.

Des progrès considérables sur les propriétés des alliages modernes ont été obtenus par la mise au point des traitements thermiques de durcissement par précipitation.

Les traitements thermiques se sont ensuite développés pour les aciers inoxydables et les alliages réfractaires, les alliages de magnésium, les alliages de cuivre et, depuis une vingtaine d'années seulement, pour les aciers à haute résistance du type maraging et les superalliages à base nickel ou cobalt.

1 : effet de traitement thermique sur le comportement des aciers

1 :1 introduction

De tous les alliages métalliques, les aciers sont parmi ceux les plus couramment employés dans les applications industrielles. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser les traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large.

Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage, donc à sa composition et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs faibles coûts présentent un grand intérêt pour leurs utilisations.

L'acier est prétendu avoir présenté des caractéristiques mécaniques élevées après traitement de trempe.

De ce fait, le choix des structures martensitiques revenues s'est naturellement imposé pour les applications souhaitées. Les propriétés mécaniques de ces structures sont très largement conditionnées par la précipitation se produisant aux différentes étapes de trempe. Ainsi, la composition chimique, la taille et la répartition des précipités sont autant de paramètres essentiels pour la caractérisation de ces états.

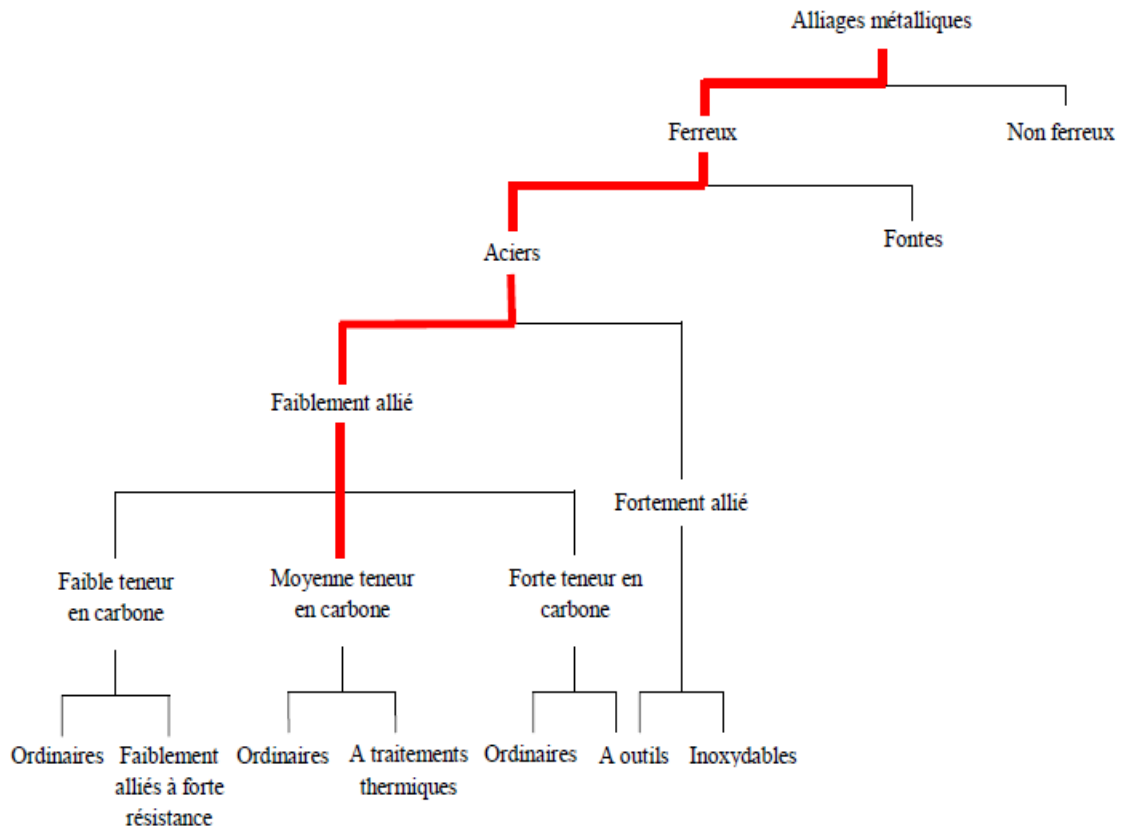
Le Fer est un élément chimique. Il est assez difficile d'obtenir du fer très pur, mais ce n'est pas gênant car les propriétés d'emploi du fer deviennent bien plus intéressantes et variées lorsqu'on lui ajoute des éléments d'alliage judicieusement choisis et dosés.

1.2 Alliages ferreux :

Les alliages ferreux sont des composés contenant du fer et ayant une valence de +2. Le type le plus commun d'alliage ferreux est l'acier doté d'une teneur en carbone située entre 0 et 2 de pourcentage pondéral. Les autres éléments d'alliage conduisent à la formation de carbures qui améliorent les propriétés du matériau telles que la dureté, la résistance à la traction et la trempabilité.

Effet de traitement thermique sur le comportement des aciers

L'acier doux, l'acier inoxydable, la fonte et le fer forgé sont d'autres métaux ferreux bien connus, principalement appréciés pour leur résistance à la traction et leur durabilité. Les alliages ferreux sont également les matériaux les plus recyclés au monde.



1.3 Influence des éléments alphagènes et gammagènes

Le fer métallique existe sous deux formes cristallines.

La variété cubique centrée, stable au-dessous de 910°C (fer α) et au-dessus de 1400°C (fer δ). Les solutions solides dans le fer α sont appelées ferrites.

La variété cubique à face centrée, stable entre 910°C et 1400°C (fer γ).

Les solutions solides dans le fer γ sont appelées austénites.

Les éléments d'addition ont des solubilités très différentes dans ces deux variétés. Ce fait entraîne l'existence de domaines de transformations très différentes en présence d'éléments d'addition (Figure 1.1).

Dans le fer pur, le passage de fer α au fer γ se produit à une Température définie. La présence d'un élément d'addition entraîne l'apparition d'un domaine plus ou moins étroit dans lequel les deux variétés allotropiques peuvent coexister en équilibre.

Les diagrammes permettent de classer les éléments d'addition en deux types [1]

1.3.1 Les éléments gammagènes :

qui abaissent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer γ et de ce fait abaissent les limites du domaine d'existence de l'austénite); ce sont essentiellement le nickel et le manganèse auxquels on peut ajouter le cuivre (peu utilisé comme élément d'alliage),

1.3.2 Les éléments alphagènes :

qui relèvent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer α et de ce fait élèvent les limites du domaine d'existence de la ferrite); ce sont les plus nombreux des éléments d'alliage tels chrome, silicium, molybdène, vanadium, tungstène, titane.

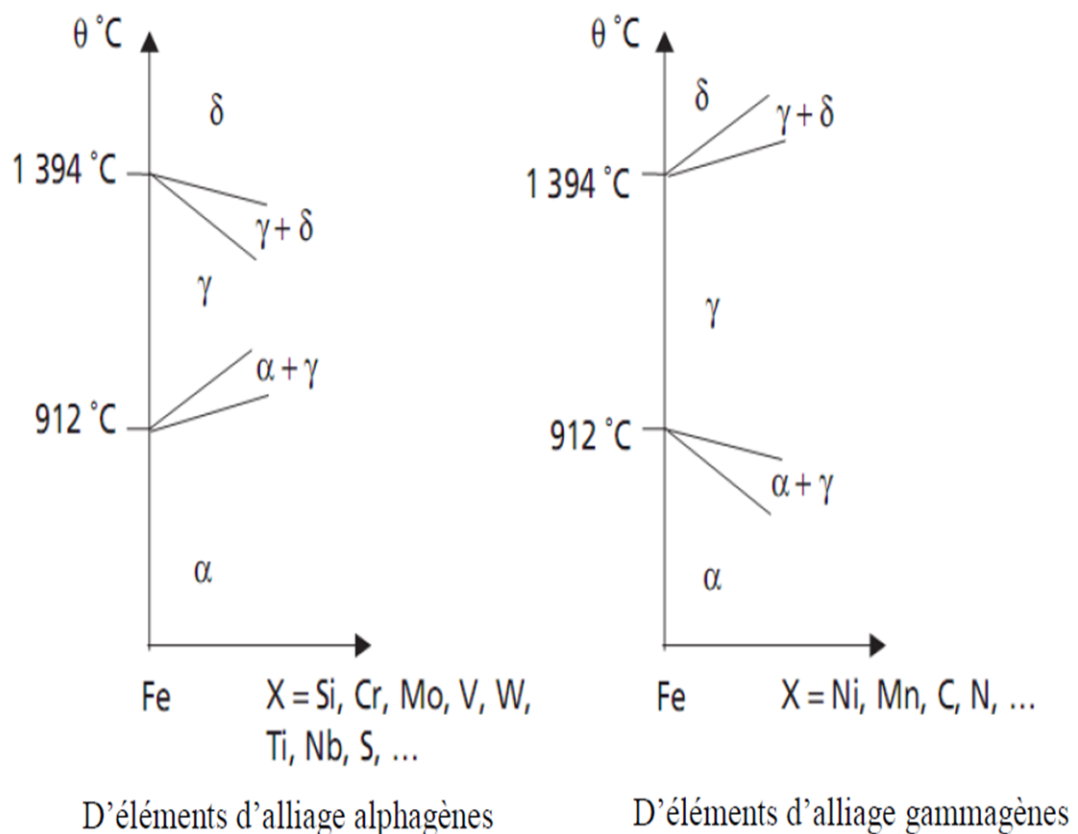


Figure 1.1 : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition [1]

1.4 Diagrammes de phases fer - carbone :

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-

Effet de traitement thermique sur le comportement des aciers

carbone. La présente section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles.

La figure 1.2 présente les températures importantes pour l'acier et la fonte. Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque domaine et chaque phase.

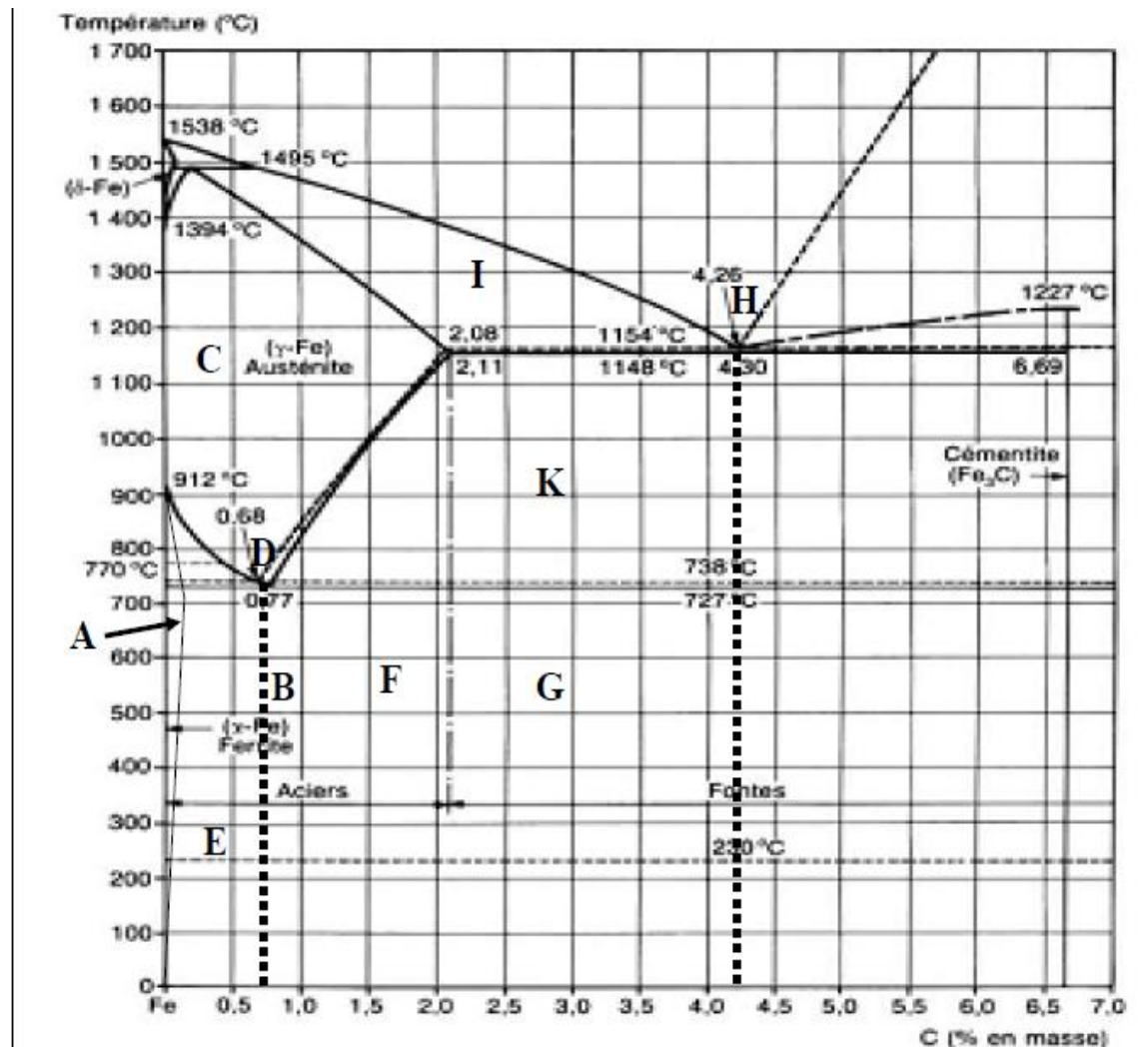


Figure 1.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone. [1]

1.4.1 La ferrite α :

Domaine marquée A, contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est une solution solide de carbone dans le fer alpha. Cette phase contient au maximum 0.02% de carbone à 727°C. Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C, la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température ambiante, la quantité de carbone diminue.

Tous les aciers et fontes contiennent de la ferrite. Cette phase comporte la même quantité de carbone, quelle que soit la teneur en carbone de l'acier ou de la fonte.

La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de 727°C. La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace.

1.4.2 L'austénite γ :

L'austénite est une solution solide de carbone dans le fer γ (domaine C). Cette phase est stable au-dessus de 727°C et en dessous de 1538°C. Dans le cas de l'austénite le fer peut dissoudre jusqu'à 2.11%C à $T = 1148^\circ\text{C}$. Dans le cas des aciers au carbone l'austénite est localisée à hautes températures. Même si elle ne se forme pas à température ambiante, c'est un domaine important pour effectuer les traitements thermiques des aciers. L'austénite est cubique faces centrées.

1.4.3 La cémentite : Fe_3C

La cémentite pure a la formule moléculaire Fe_3C . Elle peut contenir jusqu'à 6.67 %C. La concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile. Cette phase est aussi appelée carbure de fer.

.

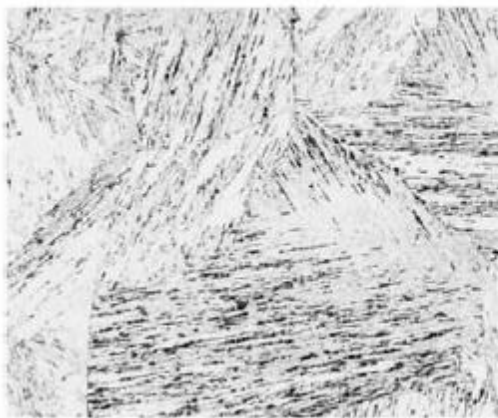
1.4.4 La perlite :

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en Couches alternées dans la microstructure.

La perlite pure (ligne B) se forme à 727°C, et contient 0.77% C, on trouve de perlite et de la ferrite, dans cette phase

Le point eutectoïde: D, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.77% de carbone et 727°C. Le point eutectoïde (0.77 %C) désigne une transformation reversible à $T = 727\text{ °C}$, c'est-à-dire $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (perlite).

Les alliages de fer qui contiennent des teneurs en carbone inférieures au point eutectoïde sont appelés aciers hypoeutectoïdes (domaine E). Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers hypereutectoïdes (domaine F). [11]



(a) X 200



(b) X 400

Figure 1.3 :(a) Martensite en lattes d'un acier à faible teneur en carbone ; (b) Martensite en plaques d'un acier à haute teneur en carbone (2)

1.5 Les aciers :

Les aciers sont des alliages fer-carbone qui comportent aussi une concentration appréciable d'autres éléments.

Il existe des milliers d'alliages de ce type dont la composition est différente, de même que les traitements qu'ils ont subis. Les propriétés mécaniques dépendent de la teneur en carbone, laquelle est normalement inférieure à 2% en poids.

1.5.1 Les aciers au carbone

On appelle acier un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% en poids. Cette teneur limite vient de la limite de solubilité du carbone, à haute température, dans la phase cubique à faces centrées (c.f.c) du fer, appelée austénite. Des éléments d'alliages sont généralement ajoutés à un alliage Fe-C afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et les propriétés des aciers.

1.5.2 Acier faiblement alliés :

La concentration en carbone de ces aciers varie de 0.25%_m à 0.60%_m. Leurs propriétés mécaniques s'améliorent par austénitisation, trempe, puis revenu. On les utilise le plus souvent à l'état revenu. Les aciers à moyenne teneur en carbone ont une faible trempabilité et leur traitement thermique n'est efficace que si leur section est très mince et si la vitesse de refroidissement est très élevée. L'ajout de chrome (Cr), de nickel (Ni) ou de molybdène (Mn) facilite l'application de traitements thermiques à ces alliages et offre un large éventail de combinaisons résistance-ductilité. Les traitements thermiques produisent des aciers plus résistants que les aciers au carbone ordinaires, mais d'une ductilité et d'une ténacité moindres. Parmi les pièces faites d'acier à moyenne teneur en carbone, mentionnons les roues de train et les voies ferrées, les engrenages, les vilebrequins ainsi que d'autres pièces de machine et des composants structuraux alliant haute résistance, résistance à l'usure et ténacité [11]

1.6 Influence des éléments d'addition sur les propriétés des aciers :

Les éléments d'addition ajoutés à l'acier ou alliage métallique à base de fer (Fe - C), jouent un rôle particulier sur les caractéristiques générales, ou un rôle commun lorsque plusieurs éléments d'addition sont présents dans la composition chimique finale.

1.6.1 Influence spécifique des éléments d'addition

Les principaux éléments d'addition du fer sont : le carbone, le chrome, le nickel, le tungstène, le molybdène, le vanadium, le manganèse, l'aluminium, le silicium, le titane, le niobium, l'azote... ; ils ont une influence significative sur les différentes caractéristiques.

1.6.2 Le carbone

Le carbone est un élément fortement gammagène, il contribue à stabiliser l'austénite lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome ? Intergranulaires qui diminuent la résistance à la corrosion intergranulaire.

1.6.3 Le chrome

Le chrome est un élément d'addition alphagène particulièrement important. Il augmente la trempabilité de l'acier. Par la formation de carbures de types M_7C_3 (1400-1500 HV), il améliore la résistance à l'abrasion, diminue le grossissement du grain lors de l'austénisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique). Suite à son rôle alphagène pour des teneurs supérieures à 7 %, il renforce la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage).

1.6.4 Le nickel

Grâce à son rôle gammagène, il stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses. Son principal intérêt est d'améliorer la trempabilité et la ténacité. Cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique.

1.6.5 Le molybdène

Cet élément donne naissance à des carbures de haute dureté (M^{AC} -1500HV, M_2C - 2000 HV) ? Qui augmentent la résistance à l'usure à chaud. De plus cet élément ralentit la cinétique d'adoucissement au revenu. Il améliore la ductilité, la mise en solution des carbures diminue la teneur en austénite résiduelle après trempe. Enfin, le **molybdène**, élément alphagène, est fréquemment utilisé à des teneurs de 2 à 5 % pour améliorer la

Effet de traitement thermique sur le comportement des aciers

résistance à la corrosion dans presque tous les milieux, à l'exception des solutions nitriques bouillantes.

1.6.6Le silicium

Le silicium, autre élément alphagène, améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. Avec une teneur voisine de 0.3 % en masse, il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration. Des teneurs d'environ 1 % entraînent une augmentation de la limite élastique, de la résistance à l'oxydation au-delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliages comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures M_2C , ce qui abaisse la fragilité du métal. Comparativement au chrome et à l'aluminium, l'addition de silicium influe d'une manière plus importante sur la résistance à l'oxydation entre 500 et 700°C. L'effet du silicium dans les alliages Fe-Al-Si, est d'établir une couche d'oxyde riche en silicium au-dessus de la couche d'oxyde d'aluminium.

L'oxyde formé est plus protecteur que l'oxyde d'aluminium et renforce l'effet protecteur de la couche d'alumine.

1.6.7Le niobium

À un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

1.6.8Le titane

Titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (Tic) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxidabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome.

1.6.9Le manganèse

Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant ; il augmente la trempabilité, permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Mais il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer.

1.6.10 Le cuivre

Le cuivre, en petites proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.

1.6.11 Le soufre

Le soufre il diminue la résistance à la corrosion.

1.6.12 le vanadium

Il affine le grain primaire donc la structure de coulée ; puissant générateur de carbures, d'où accroissement de la résistance à l'usure, de la tenue en coupe et à la chaleur ; de ce fait, utilisation privilégiée comme composant additionnel d'alliage dans les aciers rapides, de travail à chaud et résistant au fluage à température élevée. Amélioration substantielle de la résistance au revenu, réduction de la sensibilité à la surchauffe. V affinant le grain et inhibant la trempe à l'air suite à la formation de carbures, il favorise l'aptitude au soudage des aciers de traitement. Suite à la constitution de carbures, accroissement de la résistance à l'hydrogène sous pression V rétrécit la zone γ et décale le point Curie en direction de températures plus élevées.

1.6.13 le zirconium

Générateur de carbures ; utilisation métallurgique en tant qu'élément additionnel de désoxydation, dénaturation et désulfuration car laissant peu d'impuretés. Les additions de Zr dans des aciers de décolletage sulfureux et entièrement calmés exercent une influence favorable sur la formation de sulfures et évitent ainsi une cassure au rouge. Il accroît la longévité des matériaux de confection des conducteurs chauffants et provoque une striction de la zone γ .

1.7 Définitions et procédés des traitements thermiques :

1.7.1 L'austénitisation :

L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritique α (c.c) en austénite γ (c.f.c) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

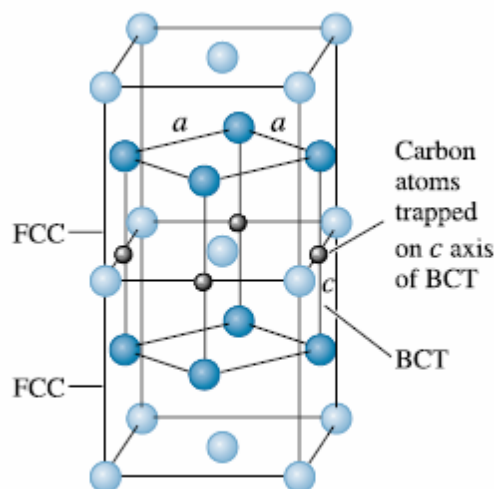


Figure 1.4 : La maille quadratique centrée de la martensite en relation avec la maille C.F.C de l'austénite (2)

1.7.2 La Trempe :

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine.

La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier ; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C.

La trempe s'effectue en général soit :

a) Trempe à l'eau :

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques. Toutefois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante. L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique. Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux ; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées. Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée).

Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

- de la température de l'eau ;
- de l'agitation des pièces ;

De la circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel. Par ailleurs, il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produits étrangers (sels notamment), qui changerait sa sévérité de trempe et empêcherait d'obtenir des résultats constants.

b) Trempe à l'huile :

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe qui peuvent différer :

- par l'huile de base (minérale ou synthétique) ;
- par les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour objet soit de modifier le Pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment résistance à l'oxydation)

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante ; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise, suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600 °C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant à la trempe à l'eau. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente

c) Trempe à l'air :

Est le cas le plus simple à mettre en œuvre et il doit être choisi en priorité dans le cas des aciers à outils de bonne trempabilité, car les risques de déformations sont d'autant plus grandes que le monde de refroidissement est plus rapide le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier.

Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans l'eau de 20.40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérent à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente.

Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable.

L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion.

Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation.

Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion). Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille.

L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$. Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température - Temps - taux de Transformation, Figure 1.5(a) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, voir Figure 1.5(b) dans le cas des trempes.

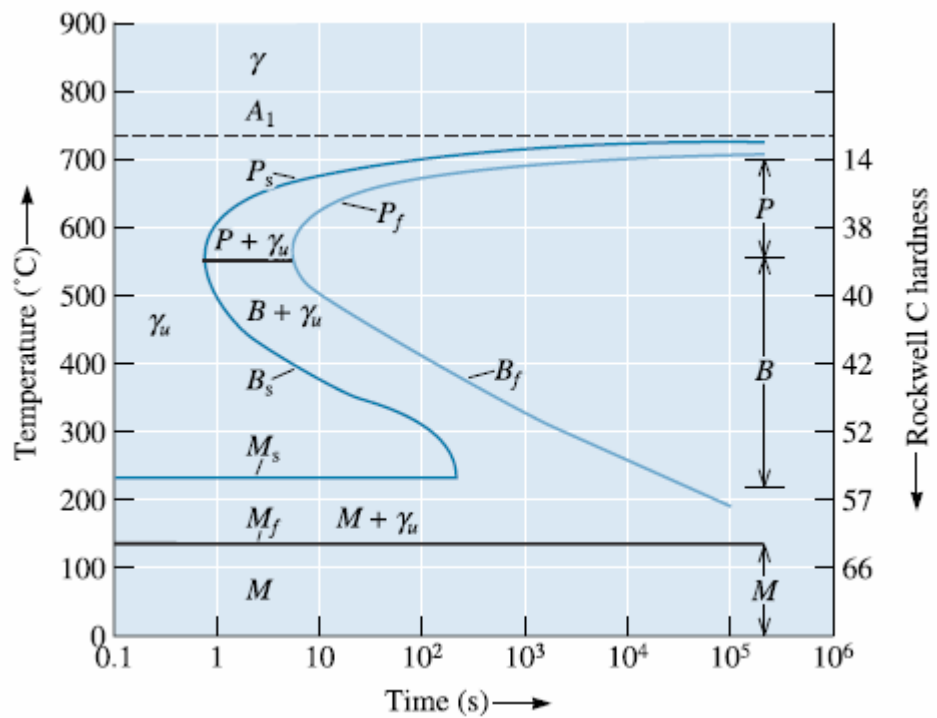


Figure 1.5(a) : Courbe TTT pour un acier eutectoïde [2].

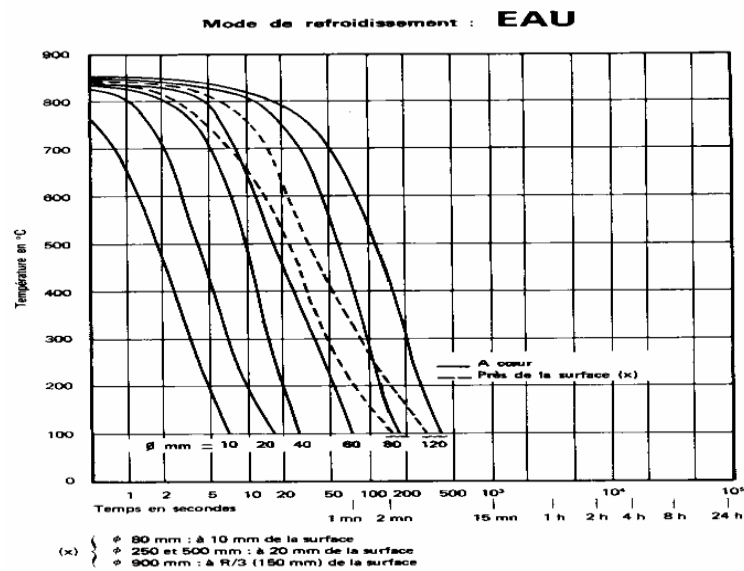


Figure 1.5(b) : diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, dans le cas des trempes [1].

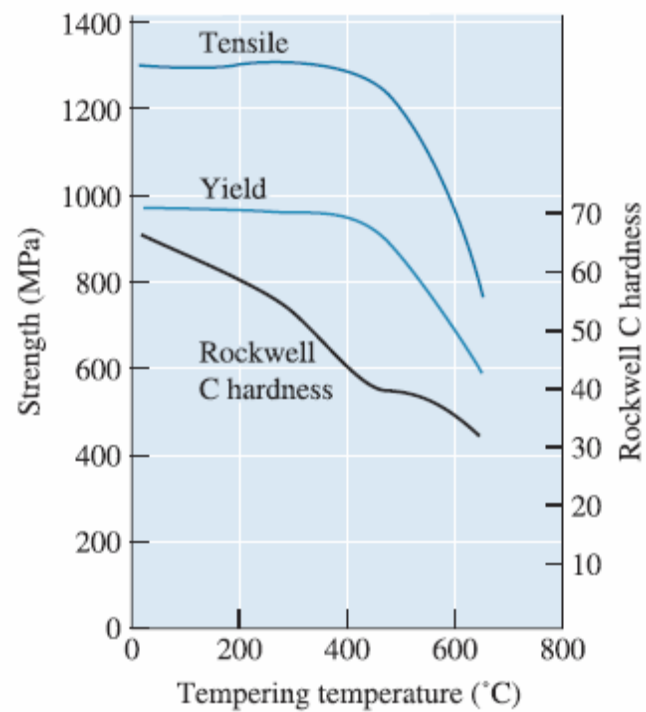


Figure 1.6 Effet de température de revenu sur les propriétés d'un acier eutectoïde [2].

1.7.3 Le revenu :

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une

Température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité.

Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe).

D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures.

La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier.

Effet de traitement thermique sur le comportement des aciers

Le diagramme montré en Figure 1.7 correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation des pièces de construction fortement sollicitées (arbres, engrenages).

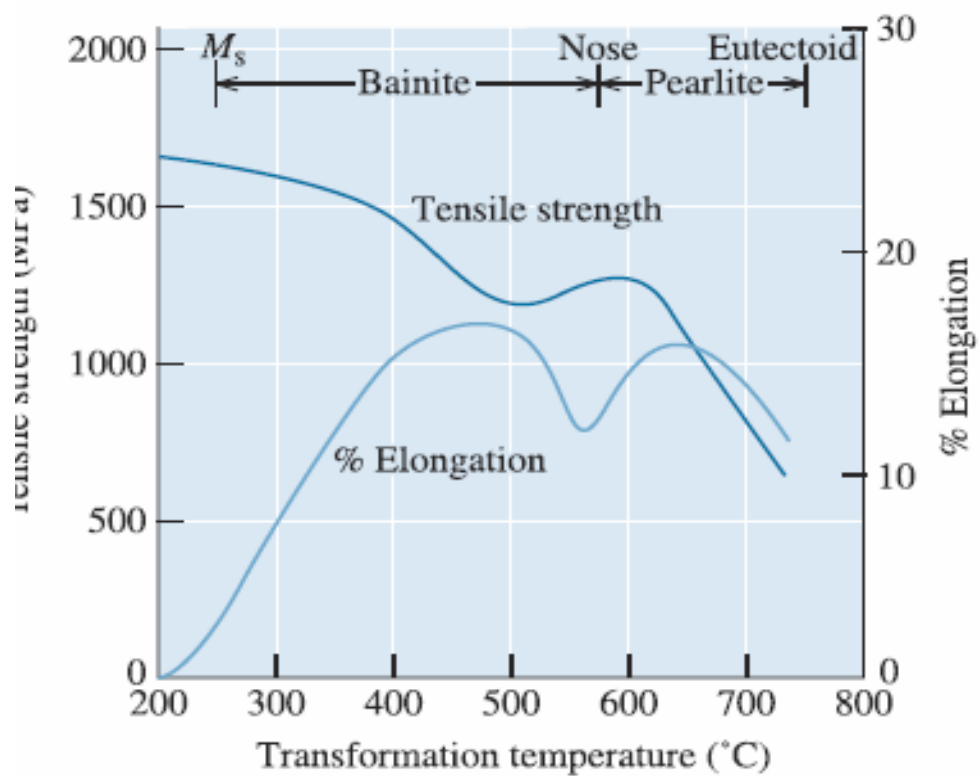


Figure 1.7 Effet de la température de transformation sur les propriétés d'un acier eutectoïde [2].

1.8 Les transformations de phases à l'état solide des aciers :

1.8.1 La transformation de l'austénite :

Le traitement thermique de l'acier commence lorsqu'il est porté à haute température dans un état complètement ou très largement austénitique. L'austénite possède alors deux caractéristiques intéressantes :

-Composition et l'homogénéité de la composition

-La grosseur du grain

Au refroidissement, l'austénite se transforme en ferrite et carbure. En ajustant les conditions de refroidissement, en particulier la vitesse, il est possible de contrôler la structure microscopique, autrement dit le mode de répartition du carbure dur dans la matrice ferritique douce. L'une des vitesses de refroidissement de l'acier à partir du domaine austénitique est la vitesse de refroidissement des produits laminés ou forgés après la dernière passe à chaud. Ce refroidissement n'est pas techniquement, un traitement thermique. Il s'agit pourtant, d'un point de vue métallurgique, d'un véritable traitement, reproductible pour une section donnée.

La décomposition de l'austénite ne commence pas instantanément lorsque la température atteint celle qui, au bout d'un temps de maintien suffisant, entraîne sa décomposition isotherme

1.8.2 Transformation perlitique :

Au cours d'un refroidissement lent, à la vitesse de 2 à 3 °C / mn, l'austénite se transforme en ferrite et en carbure lamellaire à haute température, l'austénite homogène présente une distribution embryonnaire caractéristique. Le franchissement de la température de transformation entraîne une évolution de cette distribution pendant laquelle on n'observe aucune transformation, le temps nécessaire pour atteindre ce nouvel état est appelé temps d'incubation.

Pour un acier hypoeutectoïdes, la transformation commence par l'apparition de la ferrite aux joints des grains austénitiques ; simultanément, l'austénite restante s'enrichit en carbone jusqu'à atteindre la composition eutectoïde.

Effet de traitement thermique sur le comportement des aciers

La perlite apparaît sous forme de colonies ou l'agrégat ferrite -cémentite progresse, sans relation d'orientation cristallographique avec le grain d'austénite mère

1.8.3 transformation intermédiaire bainitique :

Définition

Mélange de fines plaquettes de carbures Fe_3C et s ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$) dans une matrice de ferrite.

Elle accompagne souvent la martensite dans les aciers trempés moins dur, mais moins fragile que la martensite.

1.8.4 La transformation bainitique :

La transformation perlitique est contrôlée par un mécanisme de diffusion, alors que la transformation martensitique procède par cisaillement et en absence de diffusion.

La transformation bainitique est intermédiaire entre les deux précédentes, puisque le mécanisme mis en jeu est mixte : on observe simultanément un phénomène de cisaillement de l'austénite en ferrite, et une diffusion à courte distance du carbone.

La bainite qui apparaît à haute température, dite bainite supérieure, présente la forme de lattes, les aiguilles de ferrite bainitique étant séparées par de petites plaquettes de cémentite. Aux températures plus basses, le carbone dont la vitesse de diffusion est de plus faible, précipite sous forme de très fins carbures de type cémentite ou epsilon ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$) à l'intérieur même des aiguilles de ferrite bainitique.

Ceux -ci plus petits sont allongés selon des directions faisant un angle de l'ordre de 60° C avec l'axe des lattes de ferrite [22.23] on parle alors de bainite inférieure.

1.8.5 Transformation martensitique :

Définition :

La martensite est une phase cristalline dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite.

La martensite possède une grande dureté ($HV = 700$ à 900), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite. La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés.

1.8.6 La transformation martensitique :

Est une transformation sans diffusion. (Par glissement) Du point de vue de la cinétique, la martensite apparaît dès que l'on atteint, par un refroidissement rapide, une certaine température dite de début de la transformation martensitique (M_s), mais elle ne se poursuit pas en condition isotherme.

Du point de vue structural, la transformation martensitique correspond à un basculement coopératif des atomes qui participent à la formation d'une plaquette de martensite. La martensite a une structure proche celle de la ferrite.

La présence en sursaturation du carbone retenu dans la martensite, confère à la maille une légère déformation et le réseau devient quadratique centré, les atomes de carbone se trouvant dans les sites octaédriques. (Figure 1.4)

Les paramètres a et c de la maille quadratique de martensite dépendent de la teneur en carbone de l'acier. D'une manière générale, la martensite présente plusieurs morphologies selon cette teneur en carbone. A faible teneur ($c < 0.6\%$), on observe une martensite aciculaire fortement maclée.

Le changement de forme, engendré par le cisaillement du volume initial d'austénite se traduit par un gonflement volumique qui donne naissance à des contraintes internes considérables. Ces contraintes, d'autant plus importantes que le carbone est abondant, confèrent

Effet de traitement thermique sur le comportement des aciers

a) réseau cristallin, b) équidistance de la martensite et de l'austénite en (fonction de la teneur en carbone)

La martensite est une phase obtenue après refroidissement très rapide de l'austénite. C'est une transformation à l'état solide sans diffusion. Puisque c'est une transformation sans diffusion, elle ne suit pas régulièrement la cinétique de transformation. Le taux de transformation martensitique est si élevé, de telle sorte que la formation de cette nouvelle phase va influencer sur les propriétés mécaniques. La phase qui se forme après la trempe des aciers a été appelée «martensite» par Floris Osmond en 1895 en l'honneur du métallurgiste allemand Adolf Martens (2). Des transformations analogues à la phase martensitique se produisent également dans d'autres systèmes.

Puisque la réaction de transformation de l'austénite en martensite est sans diffusion, on dit que la réaction martensitique est une transformation athermique, c'est-à-dire que la réaction dépend uniquement de la température et non du temps. La réaction de la martensite se déroule souvent rapidement, à des vitesses proches de la vitesse de son dans le matériau.

Beaucoup d'autres alliages tels que Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni ou Ni-Ti présentent des transformations martensitiques. L'alliage Ni-Ti est un alliage typique qui présente une transformation martensitique. Ce type d'alliage peut se rappeler de sa forme (on les appelle des alliages à mémoire de forme).

1.8.7 La martensite

Dans le cas des aciers où la teneur en carbone est inférieure à 0,2%, l'austénite C.F.C se transforme en une structure martensitique C.C sursaturée en carbone. Dans le cas des aciers à hautes teneurs en carbone, l'austénite C.F.C se transforme en martensite Q.C (quadratique centrée). Pour décrire la transformation cristalline de l'austénite au cours de la trempe rapide, il est important de connaître la relation entre la maille C.F.C d'austénite et la maille de la martensite Q.C (figure 1.4). Les atomes de carbone insérés dans des sites interstitiels aux coordonnées $1/2, 0, 0$ dans le cas de la maille C.F.C peuvent être piégés au cours de la transformation en une nouvelle structure (la structure quadratique centrée) q.c. Au fur et à mesure que la teneur en carbone de l'acier augmente, un plus grand nombre d'atomes de carbone sera piégé dans ces sites, ce qui augmente la différence entre les paramètres a et c de la martensite [Figure 1.8].

L'acier est trempé ou refroidi rapidement à partir de la phase stable de l'austénite pour empêcher la formation de perlite, de la bainite ou de microconstituants primaires. Dans le cas d'un acier eutectoïde par exemple, la formation de la martensite commence lorsque l'austénite est refroidit en dessous de 220°C , cette température est notée M_s (figure 1.5(a)). La quantité de martensite formée augmente au fur et à mesure que la température diminue. Lorsque la température diminue en dessous de la température de la fin de formation de la martensite (M_f), l'acier normalement doit contenir 100% de martensite. A toute température intermédiaire, la quantité de martensite ne change pas à mesure que le temps à cette température augmente. Du fait de la conservation de la masse, la composition de la martensite doit être identique à celle de l'austénite dont elle se forme.

1.8.8 Propriétés des aciers martensitiques

La martensite est très dure et fragile. La structure cristalline quadratique centrée ne renferme pas de plans de glissement très compacts, ce qui diminue le mouvement des dislocations et par conséquent augmentation du durcissement structural. La martensite est fortement sursaturée en carbone, car le fer contient normalement moins de 0,0218% de C à la température ambiante et la martensite contient une teneur de carbone qui est celle de l'acier en question. La martensite présente une structure très fine de grains.

Effet de traitement thermique sur le comportement des aciers

La structure et les propriétés des aciers martensitiques sont fonction de la teneur en carbone (figure 1.9). A faible teneur en carbone, la martensite se développe sous forme de «lattes», composée de liasses de plaques plates et étroites qui se développent côte à côte [Figure 1.3 (a)]. Cette martensite n'est pas très dure. Lorsque la teneur en carbone augmente, on note l'apparition de la martensite en plaques, où les plaques plates et étroites se développent individuellement plutôt que qu'en liasses [Figure 1.3 (b)]. Dans ce deuxième cas la dureté est beaucoup plus importante en partie à cause de la plus grande distorsion de la structure, ou bien à cause du rapport c/a qui est plus élevé.

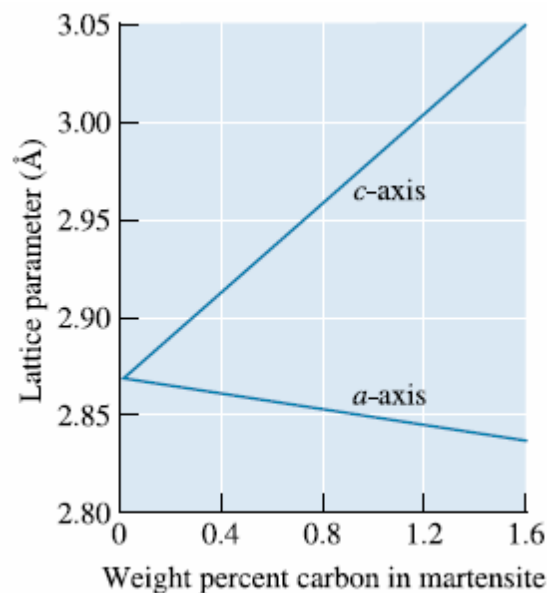


Figure 1.8 Relation entre la teneur en carbone et les paramètres de la maille q.c de la martensite
[2]

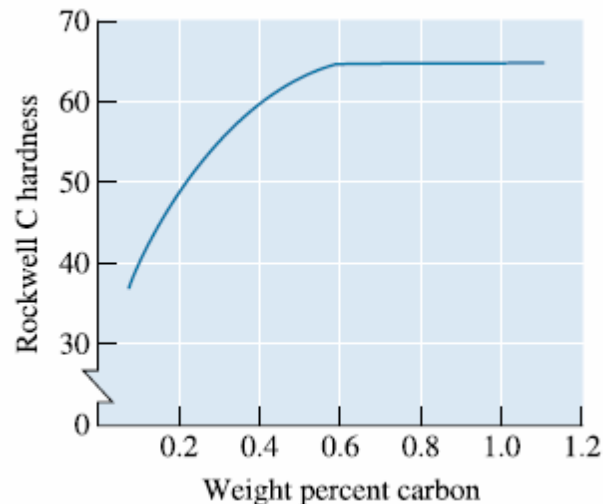


Figure 1.9 Influence de la teneur en carbone sur la dureté des aciers martensitiques. [2]

1.8.9 Revenu de la martensite

La martensite est une phase instable (hors d'équilibre). C'est pourquoi on ne l'observe pas sur le diagramme de phase fer – carbone. Lorsque la phase martensitique est chauffée au-dessous de la température eutectoïde, les phases stables α et Fe_3C se précipitent. Ce procédé est appelé revenu. La décomposition de la martensite conduit à la diminution de la résistance mécanique et à la diminution de la dureté, tandis que les propriétés de ductilité et de ténacité vont s'améliorer (Figure 1.6).

Aux basses températures de revenu, la martensite peut être constituée de deux phases de transition, une phase martensitique à faible teneur en carbone et une phase instable constituée de très fines carbures de fer de type $\text{Fe}_2,4\text{C}$. Aux basses températures l'acier revenu garde toujours des propriétés de dureté plus élevées qui peuvent même être plus dur qu'avant le procédé de revenu. Aux hautes températures, l'acier revient à l'état stable constitué de α et Fe_3C , ce qui rendra l'acier plus doux et plus ductile. Si l'acier est revenu juste au-dessous de la température eutectoïde, la cémentite Fe_3C deviendra très grossière et l'effet de durcissement structural est fortement réduit. Par le choix judicieux de la température de revenu, on peut obtenir une large gamme de propriétés.

CHAPITRE 2

Propriétés de fatigue

2 Introduction

Un métal soumis à une contrainte répétitive ou alternée échouera à une contrainte dont l'amplitude est inférieure à sa résistance à la traction. Plus la technologie s'est développée et plus la fatigue est devenue plus répandue, il est constaté qu'au moins 80 à 90 pour cent des défaillances des métaux sont dus à la fatigue [4] La fatigue peut être insidieuse parce qu'elle se produit sans préavis. Généralement, la défaillance due à la fatigue peut être reconnue par l'aspect de la surface de rupture, qui présente une zone lisse, due à l'action de frottement pendant la propagation de la fissure à travers cette zone. La défaillance due à la fatigue peut être causée par quatre facteurs majeurs.

- 1- la contrainte de traction maximale élevée.
- 2- l'amplitude élevée due à la variation de contrainte.
- 3- le nombre suffisamment élevé de cycles sous contrainte.
- 4- Les défauts de construction que ce soit internes ou externes

Beaucoup d'autres facteurs peuvent causer la défaillance en fatigue, parmi lesquels on peut citer, la concentration de contraintes, la corrosion, la température, la surcharge, la microstructure et les contraintes résiduelles.

Une structure donnée peut être soumise à des sollicitations mécaniques, de types statiques ou dynamiques. Les structures de la première catégorie durent plus longtemps ce qui justifie le dimensionnement en fonction de la résistance ou la rigidité lors la phase de conception. Par contre, dans le cas des sollicitations dynamiques, les structures sont soumises à des variations cycliques de contraintes. Ce phénomène peut conduire à des catastrophes si on ne tient pas compte de la résistance de ces structures aux variations des charges. Une structure donnée peut se détériorer même sous des charges inférieures à la limite élastique. C'est le phénomène de fatigue.

Pour arriver à comprendre le phénomène de fatigue, il est nécessaire de faire des études préliminaires sur la courbe de Wöhler qui constitue la base d'étude de la fatigue.

Ce phénomène peut être compris en réalisant une très simple expérience qui consiste à couder un fil d'acier entre deux mains dans un sens et puis dans l'autre sens, en faisant cela plusieurs fois, l'acier se chauffe et la rupture est donc constatée. 'Fig.2.1'

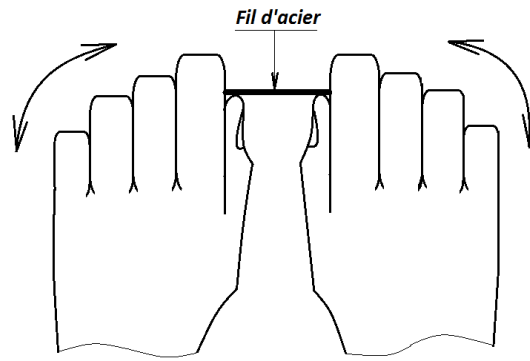


Figure 2.1. Rupture d'un fil d'acier sous l'effet d'une flexion cyclique [5]

2.1 Courbe de S.N

La fatigue dans le domaine de la science de l'ingénieur est généralement présentée en termes de courbes S-N (contraintes en fonction du nombre de cycles) qui indiquent la relation entre les contraintes alternées appliquées et le nombre de cycles nécessaire pour provoquer la défaillance ou l'échec du matériau. (Courbe « S - N » dans les pays anglo-saxon (Stress - Number of cycles))

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permette de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans tout le domaine de la fatigue.

Chaque pièce est soumise à des cycles d'efforts périodiques, N_R est le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire.

Pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée.

Ainsi, à chaque pièce essayée correspond donc un point du plan (T, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui a l'allure donnée sur la figure 2.2

Dans le cas des aciers, la courbe de Wöhler présente en général une asymptote horizontale correspondant à une contrainte dont la valeur est, par définition, la limite de fatigue.

Propriétés de fatigue

En revanche, pour certains alliages d'aluminium, de cuivre, ou titane et dans le cas d'essais de fatigue sous corrosion, la courbe de Wöhler ne prend pas d'asymptote pour les grands nombres de cycles et il n'est pas sûr que la limite de fatigue existe [3].

Cette courbe représente la variation d'une des contraintes dynamiques précitées en fonction du nombre de cycles à rupture (reporté sur échelle logarithmique).

Cette courbe partage le plan de coordonnées en trois domaines.

1-Domaine de la fatigue oligocyclique, où les ruptures, précédées d'une déformation plastique globale notable, surviennent après un petit nombre de cycles ($N_R \leq 10^5$) ;

2-Domaine d'endurance limitée ($N > 10^5$ cycles) les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycles croissants avec la décroissance des contraintes.

3-Domaine d'endurance illimitée où les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce.

Entre les deux derniers domaines la courbe de Wöhler présente un coude plus ou moins prononcé compris entre 10^6 et 10^7 cycles.

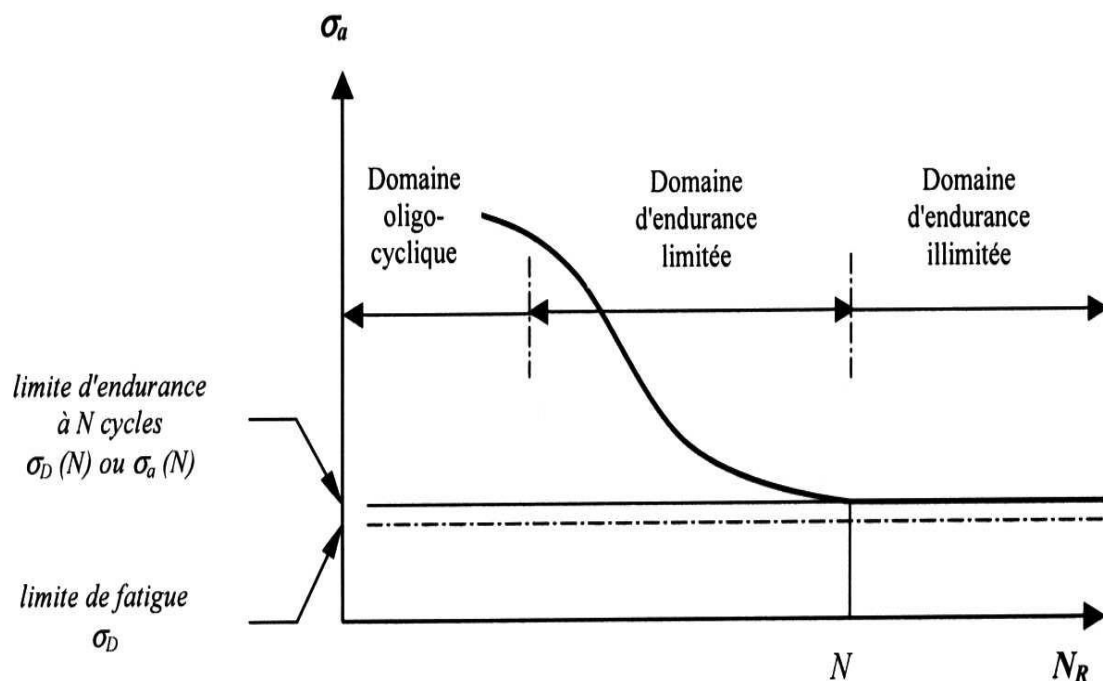


Figure 2.2 Allure de la courbe de Wöhler [3]

2.1.1 Effet de la concentration de contraintes sur la fatigue :

La présence de défauts dans un matériau tels que les trous, les entailles ou les pores comme c'est le cas des produits obtenus par la métallurgie de poudres, peut réduire la résistance à la fatigue. En effet, la fatigue des matériaux est généralement causée par la présence des irrégularités géométriques telles que les filets, les filetages et les trous. La fatigue peut être réduite au minimum en réduisant les concentrateurs de contraintes en présence, en utilisant une bonne conception, une fabrication minutieuse, et en réduisant le nombre de pores dans le cas des produits obtenus par la métallurgie de poudres. L'effet de concentration de contraintes est généralement déterminé en introduisant dans les échantillons une entaille en V ou une entaille circulaire, cela dépend du matériau à étudier. Le type d'entaille et la bonne géométrie des échantillons ont un rôle important dans la diminution de la limite de fatigue.

2.1.2 Effet de la taille

L'expérience a montré que la taille des pièces ou composants influe sur la résistance à la fatigue. La résistance à la fatigue des échantillons volumineux est plus faible comparée aux petits échantillons [5]. Les défauts indésirables sont généralement un bon lieu d'initiation des fissures, ce qui favorise la propagation de ces dernières. Ce type de défauts est plus susceptible d'être rencontré dans les pièces volumineuses que dans les pièces minutieuses.

2.1.2.1 Coefficient théorique de concentration de contraintes K_t

Les définitions qui suivent reposent sur une constatation fondamentale. Pour un type de chargement donné, le rapport entre la contrainte réelle (***dans le cas où elle est inférieure à la limite d'élasticité***) et la contrainte nominale en un point ne dépend pas de la valeur de la charge appliquée. Le choix du coefficient qui représentera les concentrations de contraintes est donc tout naturel.

L'indice « t » est employé pour indiquer que ces coefficients sont théoriques et que leur calcul repose sur les hypothèses de la théorie de l'élasticité.

K_t est défini comme le rapport de la contrainte maximale réelle dans la zone de discontinuité (entaille, trou, par exemple) à la contrainte dans la section nette :

$$K_t = \frac{\sigma_{réelle}}{\sigma_{nom}}$$

$\sigma_{réelle}$ est calculable par les méthodes analytiques pour les géométries simples.

Elle est également mesurable par les techniques d'analyses de contraintes

Propriétés de fatigue

expérimentales comme la photoélasticimétrie, l'extensomètre.

σ_{nom} est calculable à l'aide des formules de résistance des matériaux, en considérant la pièce comme une barre ou une plaque sans prendre en compte la discontinuité géométrique.

Le coefficient K_t est déterminé expérimentalement. Il dépend essentiellement de trois éléments particuliers :

La géométrie de l'accident

La géométrie de la pièce

Le type de sollicitation

Il est donc différent pour chaque accident de forme et pour chaque sollicitation. La façon la plus pratique de le déterminer, en l'absence d'un modèle mathématique plus performant, est d'utiliser des courbes ou abaques propres à chaque cas de figure

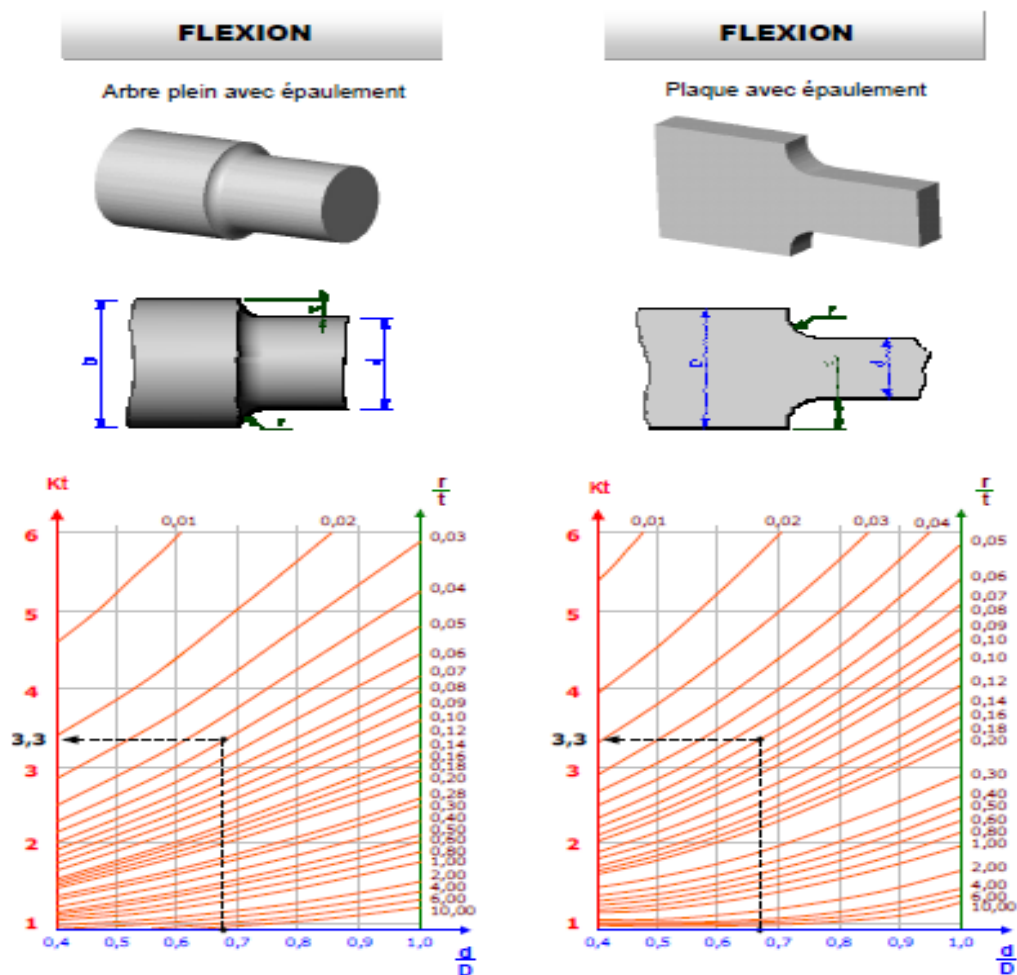


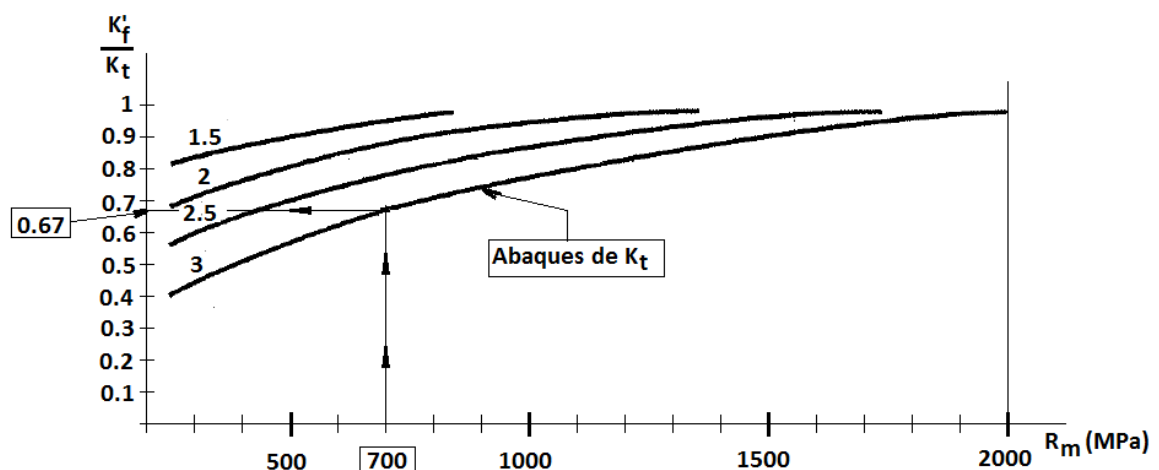
Figure 2.3.1 abaques propres d'arbre plein ou flexion [5]

2.1.2.2 Relation entre le facteur de concentration de contrainte et le facteur de concentration de contrainte en fatigue :

Dans le cas de la rupture par fatigue, on notera que pour un matériau donné, la limite d'endurance diminue quand le facteur de concentration de contrainte k_t augmente. Cette diminution est d'autant plus forte que le matériau possède des caractéristiques mécaniques élevées. D'autre part, pour les fortes valeurs de k_t , on observe que la limite d'endurance est sensible aux variations de la résistance statique de l'acier. Ces observations ont amené Peterson à définir un coefficient de sensibilité à l'entaille q , qui s'exprime par

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad \text{Pour la contrainte normale (traction et flexion)}$$

k_f le facteur de concentration de contrainte en fatigue. k_t le facteurs de concentration de contrainte



Figur2.3.2.Abaques pour déterminer le facteur de concentration de contraintes en fatigue[5]

2.1.3 Effet de la surface sur la fatigue

Il est logique de dire que la défaillance d'un matériau devrait commencer à la surface car c'est le lieu de la concentration de contraintes. Les facteurs influençant la surface d'un échantillon fatigué peuvent être de trois types, la rugosité (concentration de contraintes), la variation de la résistance à la fatigue à la surface du métal et la modification des contraintes résiduelles à la surface causée par l'oxydation et par la corrosion.

2.2 Théorie statique de la fatigue des métaux

2.2.1 Fatigue et endurance

Définitions : On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux, consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux

Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle $\sigma_{\max}$ par la valeur moyenne de la contrainte σ_m et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

D'une façon très générale, la fatigue est prononcée chaque fois que le matériau est soumis à des efforts variables dans le temps. Dans cet état de cause, la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à la résistance à la traction et même à la limite d'élasticité du métal, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois.

2.2.2 Limite de fatigue

Pour une contrainte moyenne σ_m donnée, c'est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas observé de rupture après un nombre infini de cycle. Dans le cas particulier des aciers, il est expérimentalement constaté que ce nombre infini peut être ramené à 10^7 cycles. En revanche, pour les aciers en présence de corrosion et pour certains alliages d'aluminium, de cuivre ou de titane, cette limite de fatigue reste théorique et sans intérêt puisque tous les mécanismes ont une durée de vie limitée par suite de l'usure, la corrosion ou d'autres causes inhérentes à leur service même ; on est donc conduit à utiliser une autre grandeur appelée limite d'endurance.

2.2.3 Limite d'endurance

Pour une contrainte moyenne σ_m , la limite d'endurance est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de sollicitations. La limite d'endurance en contraintes purement alternées s'écrit $\sigma_D(N)$.

Propriétés de fatigue

Cette valeur peut être déterminée à l'aide de méthodes statistiques. Dans le cas des aciers, la censure est généralement de 10^7 cycles, mais on peut déterminer expérimentalement la limite d'endurance pour des censures différentes, suivant la nature du matériau ou de la pièce essayée. Ce sera par exemple 10^7 cycles pour un rail de chemin de fer, 2×10^6 cycles pour une pièce soudée.

2.2.4 Durée de vie

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N . L'exécution de n cycles ($n < N$) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident [1].

2.2.5 Contraintes appliquées

En service ou au cours d'essai de laboratoire, les efforts appliqués peuvent être des sollicitations de type simples, par exemple de traction-compression, de flexion ou de torsion, ou résultant d'une combinaison de ces sollicitations [2].

Généralement, au cours d'essais de fatigue, la contrainte appliquée variera suivant une fonction du temps approximativement sinusoïdale, ceci en raison des seules possibilités de fonctionnement des machines ou pour des raisons de commodité dans le traitement des résultats d'essai

2.2.6 Contrainte nominale

La contrainte prise en charge au cours de l'essai de fatigue est une contrainte nominale. Elle est calculée par rapport à la section nette de la pièce ou de l'éprouvette considérée, à l'aide de formules usuelles de la résistance des matériaux et relative au domaine élastique. Elle ne fait pas intervenir la concentration de contrainte due à des entailles, ou à d'autres causes.

La contrainte calculée est exprimée en (N/mm^2) ou en pascal ($1\text{Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$).

2.2.7 Cycle de contrainte

C'est la plus petite partie de la fonction contrainte-temps qui se répète périodiquement. Il existe plusieurs termes et symboles pour décrire le cycle de contrainte, parmi lesquels on peut citer

- la contrainte maximale ($\sigma_{\max}$) : valeur maximale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte ;
- la contrainte minimale ($\sigma_{\min}$) : valeur minimale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte ;
- la contrainte moyenne (σ_m) qui est définie par la valeur algébrique : $\sigma_m = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_{\max}}{2}$
- l'amplitude de contrainte (σ_a), appelée aussi contrainte alternée, définie par la valeur algébrique : $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$;
- le rapport de contrainte (R_σ), définie par le rapport algébrique : $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$;
- l'étendue de variation de la contrainte ($2\sigma_a$) qui est la différence algébrique entre la contrainte maximale et la contrainte minimale du cycle de contrainte :
 - $2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$

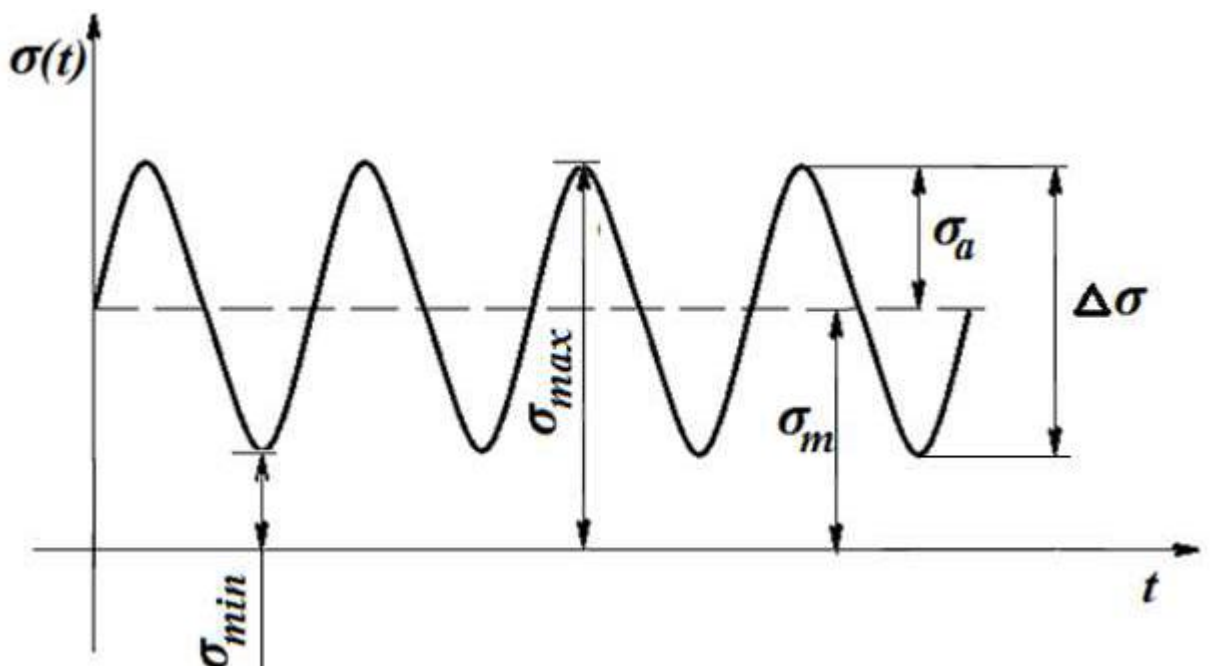


Figure 2.4 cycle de contrainte sinusoïdale

2.2.8 Types de cycles de contraintes

- contrainte purement alternée : contrainte qui varie entre des valeurs égales, dans le sens positif et négatif ;
- contrainte alternée : contrainte qui évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative dont les valeurs absolues sont différentes ($0 < \sigma_m < \sigma_a$) ;
- contrainte répétée : contrainte qui varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive, ou entre 0 et une valeur minimale négative ($\sigma_m = \sigma_a$) ;
- contrainte ondulée : contrainte qui varie entre les valeurs maximale et minimale qui sont de même signe ($\sigma_m > \sigma_a$)

2.2.9 Diagrammes représentatifs

Pour présenter de manière facilement utilisable les résultats d'essais de fatigue, il existe un assez grand nombre de méthodes ou arrangement possibles, des paramètres utilisés en fatigue :

- temps : sous la forme d'un nombre de cycles N ;
- contraintes :
 - statiques (R_e, R_m) ;
 - dynamiques ($\sigma_m, \sigma_a, \sigma_{\max}, \sigma_{\min}, \sigma_D$) ;

Parmi toutes les méthodes existantes, nous développerons les plus utilisées et les plus riches en renseignements.

2.3 Fatigue oligocyclique

Il est généralement admis que ce domaine correspond à des contraintes élevées supérieures à la limite d'élasticité du matériau. Le nombre de cycles a rupture s'étend de $\frac{1}{4}$ jusqu'à 10^4 ou 10^5 .

Sous l'effet de cycles en déformation imposée, la courbe effort-déformation prend la forme d'une boucle d'hystérésis ouverte qui se stabilise et se ferme au bout d'un certain nombre de cycles, au cours desquels le matériau s'adapte aux sollicitations cycliques.

Cette accommodation en fatigue peut se produire de deux manières : Il pourra y avoir durcissement ou adoucissement suivant l'état initial de matériau.

2.4 Propagation des fissures par fatigue :

Les fissures qui s'amorcent en surface, se propagent à la fois en surface et en volume. Une très faible fraction de fissures surfaciques est concernée par une propagation en volume. La propagation des fissures peut se décomposer en deux stades (Figure 2.4)

Stade 1 : les microfissures qui se sont formées dans l'étape précédente progressent lentement à l'intérieur des grains suivant le plan de la bande de glissement où elles sont nées. Généralement, la direction de propagation est celle du plan de scission maximal (mode II). Ces fissures restent bloquées devant les barrières microstructurales (joints de grains/phase) et seule une partie de celles-ci passeront au stade 2. Si la fissure se crée au voisinage d'une inclusion ou dans le volume, il n'y a pas de stade 1, elle se développe directement selon le stade 2.

Stade 2 : les fissures passent les barrières microstructurales, se propagent dans les grains et leurs trajectoires s'ajustent. Elles quittent le plan de scission maximale pour se propager, en première approximation, dans le plan de la contrainte maximale de traction (mode I). Ceci est dû au fait que le rapport entre la contrainte de cisaillement et la contrainte principale de traction diminue avec la profondeur de pénétration de la microfissure.

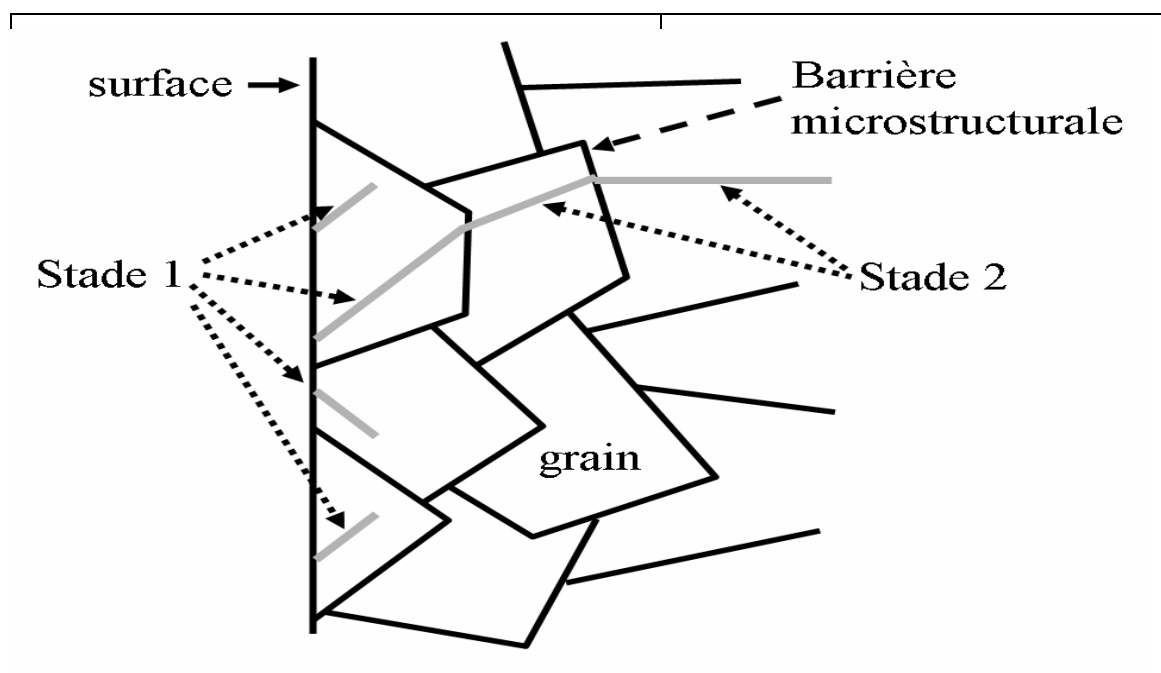


Figure 2.5 stades de propagation de fissure [4]

Beaucoup d'approches sur le phénomène de fatigue considèrent que la résistance à la fatigue est liée à la résistance à la propagation des fissures. Les premières avancées dans l'étude de la propagation de fissures datent de la fin des années 1960. Irwin a montré en 1957 que les concentrations de contrainte en tête de fissure pouvaient être caractérisées par un scalaire K , le facteur d'intensité de contrainte.

Paris est le premier en 1961 à relier le taux de propagation d'une fissure par cycle à ce facteur d'intensité de contrainte, Aujourd'hui la loi de Paris est connue sous la forme (Figure 2.5) :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Où a est la longueur de fissure, $K = K_{max} - K_{min}$, C et m sont des constantes.

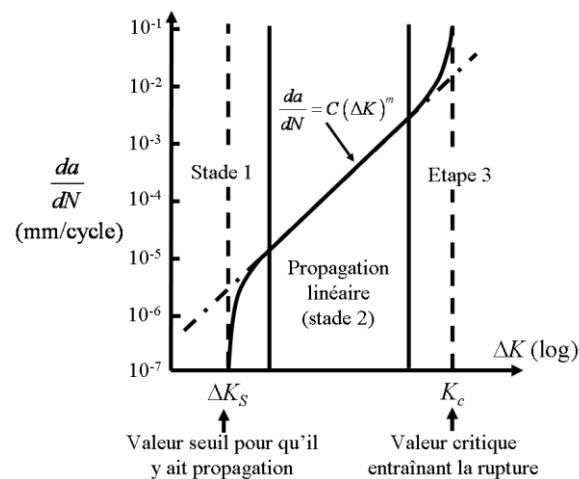


Figure 2.6 loi de Paris [4]

Enfin, en 1968 Elber a observé que lors d'un essai de traction, la fissure de fatigue se referme avant que la charge appliquée à la pièce ne soit nulle Il a modifié la loi de Paris en introduisant un facteur d'intensité de contrainte efficace K_{eff} .

Lorsque la fissure atteint une profondeur comprise en 3 et 5 diamètres moyens de grain, ce qui arrive environ à 90% de la durée de vie du matériau, la fissure devient macroscopique et passe à l'étape 3

Stade 3 : Rupture brutale

Lors de cette dernière étape, la fissure macroscopique progresse rapidement jusqu'à ce que la section résiduelle du matériau devienne trop faible pour supporter la sollicitation, ce qui entraîne la rupture brutale du matériau.

La rupture due à une fissure née dans le volume concerne surtout les pièces qui ont subi un traitement surfacique comme un grenaillage ou une nitruration visant à améliorer leurs propriétés surfaciques du point de vue de la tenue en fatigue. En fatigue gigacyclique, l'amorçage se fait également généralement dans le volume.

2.5 Méthodes expérimentales

2.5.1 Courbes d'équiprobabilité de rupture

(Courbes (P.S.N) dans les pays anglo-saxon)

La courbe de Wöhler dont nous venons de parler étant une courbe moyenne, son utilisation peut s'avérer délicate du fait que les valeurs relevées indiquent seulement que la pièce a « autant de chances de se rompre que de ne pas se rompre ».

Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de Wöhler constitue un cas particulier ($p=50\%$ de rupture) sont alors tracées en sous traçant à la valeur moyenne une certaine valeur fonction de la probabilité de rupture recherchée

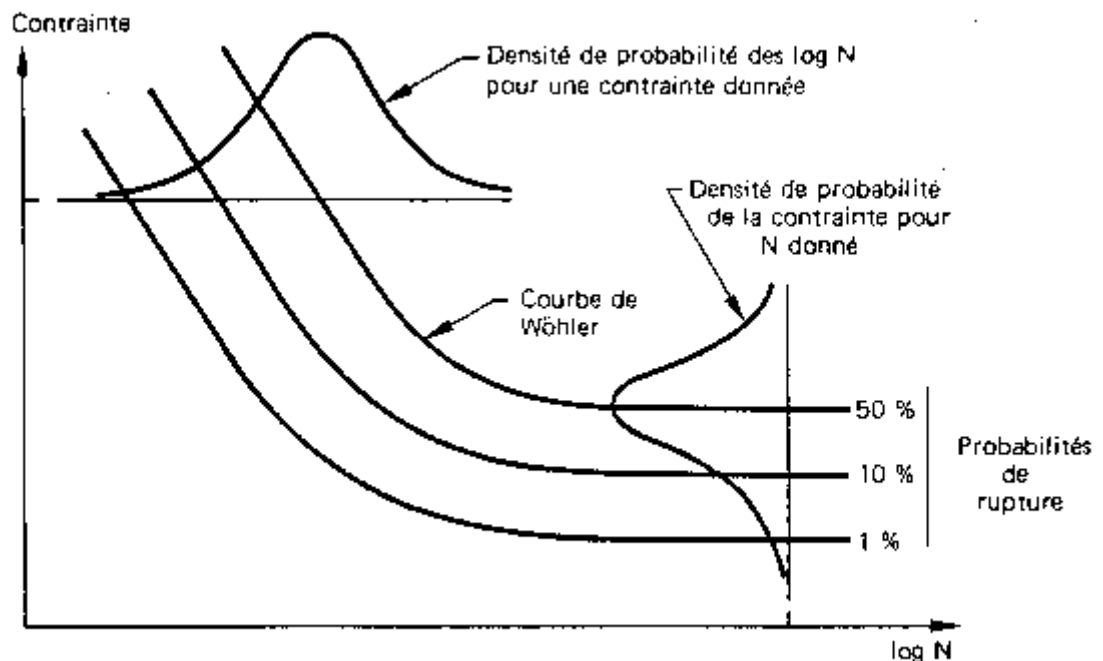


Figure 2.7 Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [3]

2.5.2 Diagramme de Haigh

Sur ce diagramme, l'amplitude de contrainte σ_a est portée en fonction de la contrainte moyenne à laquelle a été réalisé l'essai de fatigue (figure 2.7) [3].

Propriétés de fatigue

Deux points particuliers sont à considérer :

- le point A, qui représente la limite d'endurance σ_D en sollicitation purement alternée

($\sigma_D = OA$) ;

- le point B, qui représente le comportement limite du matériau pour une contrainte alternée nulle. Ce point correspond donc, à la contrainte de rupture du matériau au cours d'un essai statique.

L'ensemble des limites d'endurance observées pour diverses valeurs de la contrainte moyenne, se placent alors sur une courbe AB ajustée en fonction des résultats d'essais. Le domaine limité par cette courbe AB et les deux axes de coordonnées, représentent le domaine de fonctionnement autorisé avec le matériau pour avoir une durée de vie supérieure ou égale aux nombres de cycles pour lequel a été déterminée la limite d'endurance [3].

Sur ce diagramme on utilise parfois des « rayons » qui représentent le rapport entre σ_a et σ_m . Ces rayons sont alors paramétrés en fonction des valeurs que prennent ce rapport.

Le diagramme de Haigh peut être ensuite limité par la droite représentant la limite d'élasticité du matériau.

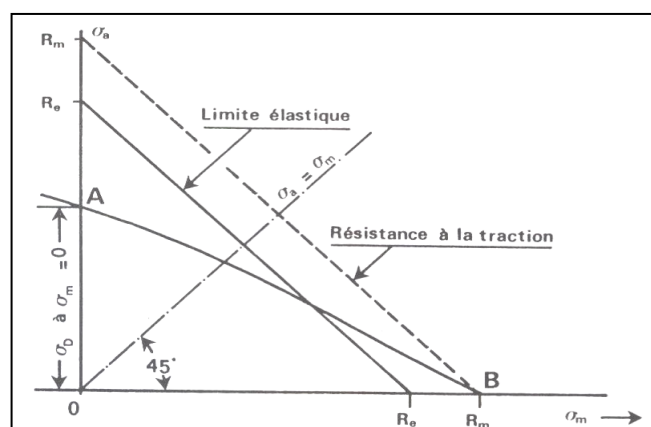


Figure 2.8 Diagramme de Haigh [3]

Propriétés de fatigue

Plusieurs représentations de la courbe AB ont été proposées et qui permettent de construire un diagramme d'endurance approché, lorsqu'on ne connaît que la limite d'endurance en sollicitation purement alternée et les caractéristiques mécaniques statistiques (R_e , R_m) du matériau.

- Droite de Goodman : $\sigma_a = \sigma_b \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right)$.

- Droite de Söderberg : $\sigma_a = \sigma_b \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_e} \right)$.

- Parabole de Gerber : $\sigma_a = \sigma_b \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right)$.

La figure 1.4 montre que les droites de Goodman et Söderberg, pénalisent fortement la tenue en fatigue par rapport à la formule parabolique de Gerber. Cette dernière relation est intéressante dans le domaine $\sigma_m > 0$.

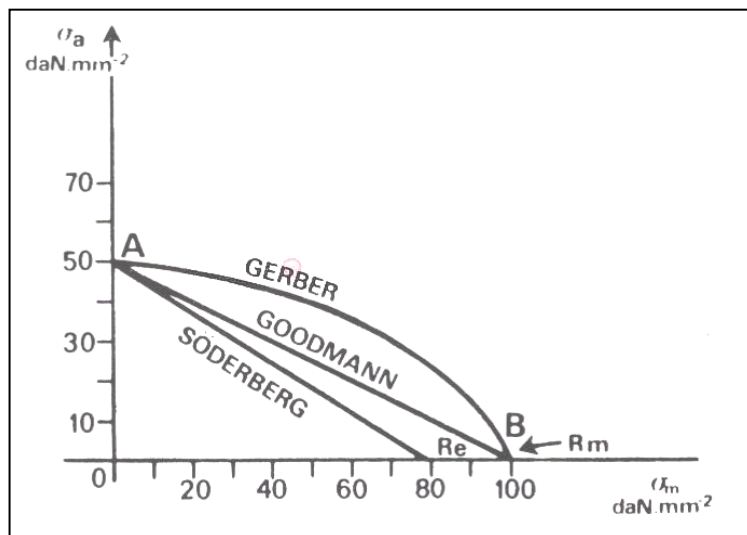


Figure 2.9 Différentes représentations de la courbe AB [3]

D'autres relations paraboliques $f(\sigma_a, \sigma_m)$ ont été proposées pour tenir compte de l'amélioration de la fatigue dans le domaine des compressions, telles que les relations de Bahuaud ou de Dietmann.

2.5.3 Diagramme de Goodman-Smith

Sur ce diagramme les contraintes maximales $\sigma_{\max}$ et minimales $\sigma_{\min}$ sont représentés en fonction de la contrainte moyenne σ_m (figure 2.9) [3].

Les points particuliers A et B précités, se retrouvent ainsi que les différentes formes de courbes pouvant les relier (droite de Goodman, parabole de Gerber ou toute autre courbe représentative d'une fonction ajustée aux résultats d'essais).

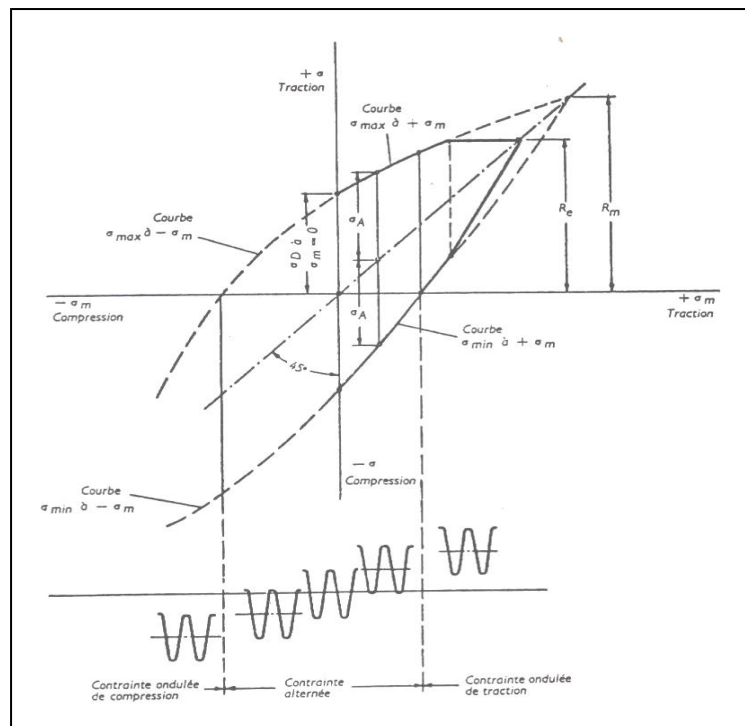


Figure2.10 Digramme de Goodman-Smith (résultats théoriques) [3]

2.5.4 Diagramme de Roš

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxons, ce diagramme représente la contrainte maximale $\sigma_{\max}$ en fonction de la contrainte minimale $\sigma_{\min}$ (figure 2.8). En plus des deux points particuliers A et B précités, il apparaît un autre point particulier C pour lequel $\sigma_{\min}=0$ [3].

Un certain nombre de valeurs particulières du rapport des contraintes $R_{\sigma} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

($R_{\sigma} = -\frac{1}{2}$ et $R_{\sigma} = +\frac{1}{2}$) sont souvent indiquées sur ce diagramme.

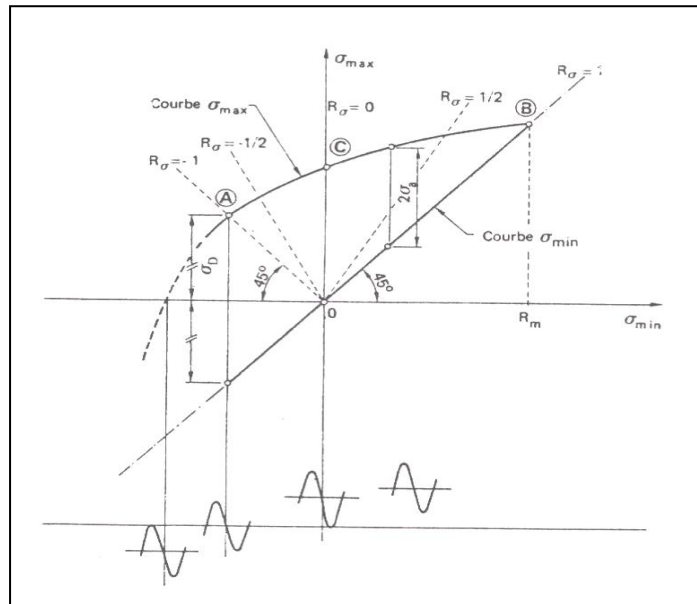


Figure 2.11 Diagramme de Roš (résultats théoriques) [3]

2.5.5 Diagrammen de Moore-Kommers-Jasper

Ce diagramme représente la contrainte maximale $\sigma_{\max}$ en fonction du rapport des contraintes $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ (figure 2.9).

Ce diagramme présente un grand intérêt pour la détermination de $\sigma_{\max}$ lorsqu'on ne connaît pas la contrainte moyenne σ_m [2]. Il est construit à partir des points particuliers A, B et C précités.

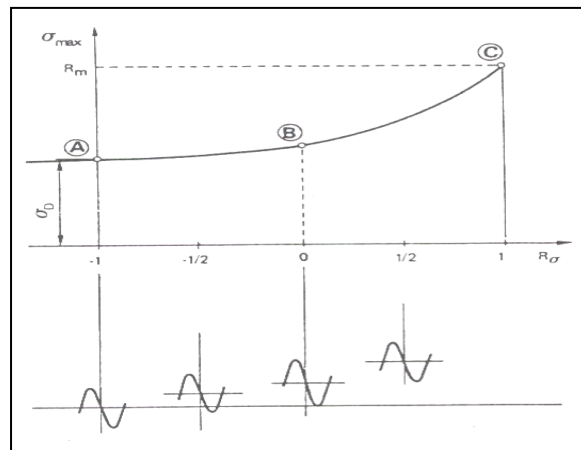


Figure 2.12 Diagramme de Moore-Kommers et Jasper [3]

CHAPITRE 3

Procédées expérimentaux

3.1 CHOIX DE L'ACIER

Le matériau étudié est un acier C45 (XC48) est fourni sous forme de barres cylindriques laminées de 20 mm de diamètre. Cet acier comme tous les aciers à moyen carbone s'emploie dans la construction mécanique après normalisation, amélioration pour une variété de pièces (vilebrequins, bielles, arbre à cames, pignons,...). Dans l'état normalisé, l'acier XC48 possède une grande résistance par rapport aux aciers de faible carbone mais sa ductilité est plus faible.

Les essais de fatigue sont effectués sur des éprouvettes cylindriques normalisées de 10 mm diamètre et de 185.7 mm de longueur (figure 3.7). Les essais de fatigue sur éprouvettes cylindriques sont réalisés en flexion rotative sous air, à la température ambiante en utilisant une machine d'essai en fatigue modèle GUNT WP140 avec une vitesse de rotation d'approximativement 3000 tr/min.

3.1.1 Composition chimique de l'acier

3.1.2 Moyen de détection

La détection de la composition chimique de l'acier choisi est faite dans le laboratoire de mesure de **MEI –Sonelgaz** à moyen d'un spectromètre de type : **SPECTRO** de marque thermo- scientifique,

3.1.3 Composition chimique

La composition chimique de l'acier C45 est donnée au-dessous (tableau 3.1)

Fe	Mn	Sn	Cu	Ti	Cr	Mo	Ni	C
98.210	0.759	0.009	0.175	0.046	0.164	0.043	0.115	0.47

Tableau 3.1

3.2 Caractéristiques mécaniques

Pour satisfaire l'étude du phénomène de fatigue sur l'acier retenu, quelques données de traction étaient nécessaires.

3.2.1 Les essais de traction

Ils ont été réalisés au laboratoire de génie mécanique de l'**université de Msila** sur une machine d'essai de matériaux, modèle **WP 310** qui fonctionne selon les conditions suivantes :

3.2.3 Conditions relatives à la température

Etendue admise pour la :

- Température ambiante : +18° à 28°c suivant DIN 50 014.
- Humidité de l'air : < 90 %.

* Conditions relatives à l'environnement :

Le lieu d'installation est peu poussiéreux et à l'abri de toute humidité (eau, huile), il faut éviter les chocs et les vibrations

3.2.4 Les éprouvettes

Les éprouvettes sont normalisées et dont les dimensions représentées dans la mise en plan figure 3.4

3.2.5 Résultats des essais

Test report

Kind of test:	Tensile test DIN 50106
Material of specimen:	95Mn28
Dimensions of specimen:	Tension specimen B8 x 103 DIN 50125
Temperature:	20°C
Upper/lower tensile yield strength ReU	
Yield stress Rp:	
Tensile Strength Rm:	649,55 N/mm²
Elongation at fracture A:	
Contraction at fracture Z:	
Date:	30.04.2017
Name of tester:	

Print Cancel Save

Figure 3.1 Test de rapport- matériau acier XC 48 laminée

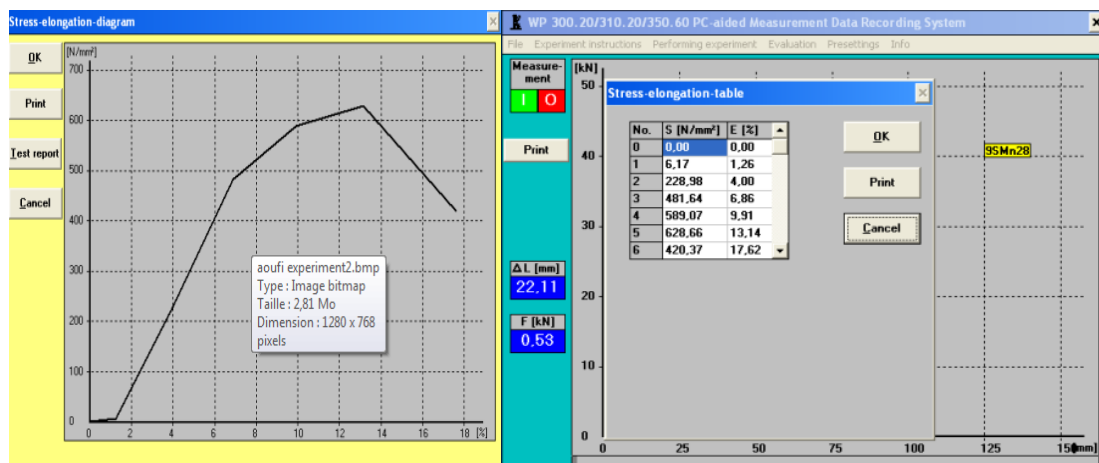


Figure 3.2 Courbe de traction (acier trempé à 803°C et revenu à 300°C)

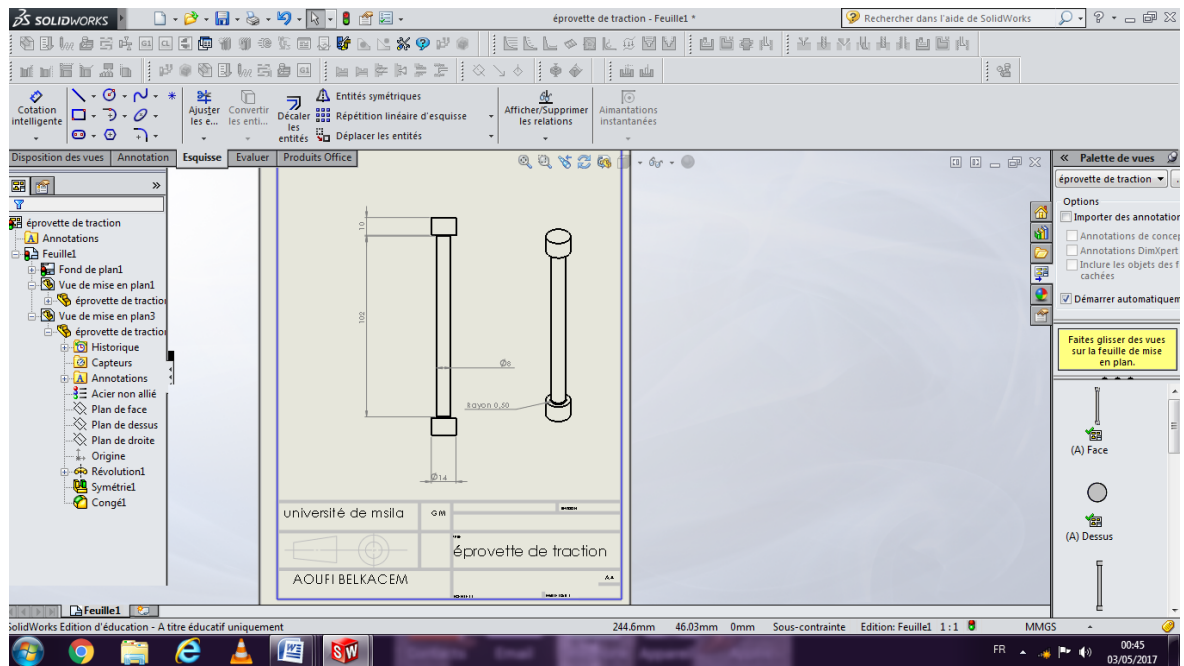


Figure 3.3 Epreuve d'essai de traction réalisée sur solidworks

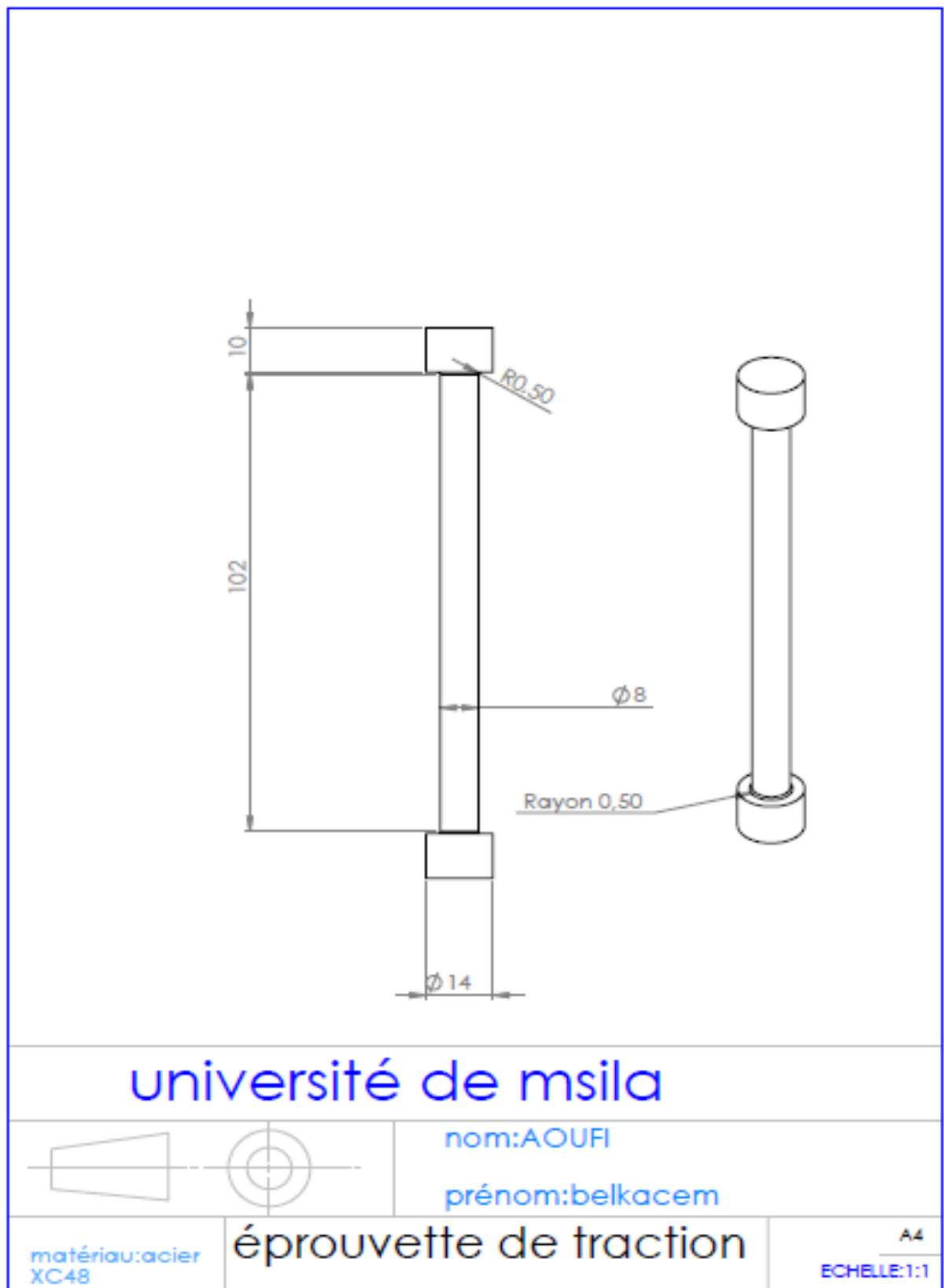


Figure 3.4 mise en plan de l'éprouvette de traction

Procédés expérimentaux

R_e : Limite élastique.

L'effort de traction est tel que tout dépassement de cet effort de traction a pour effet de provoquer des déformations résiduelles irréversibles dans la matière qui l'a subi.

$$R_{e(1)} = 450 \text{ N/mm}^2.$$

$$R_{e(2)300^\circ} = 480,5 \text{ N/mm}^2.$$

$$R_{e(3)450^\circ} = 430,7 \text{ N/mm}^2.$$

R_m : Résistance à la rupture (Résistance mécanique).

Effort de traction à partir duquel la matière se brise en deux parties.

$$R_{m(1)} = 649,55 \text{ N/mm}^2.$$

$$R_{m(2)300^\circ} = 670,5 \text{ N/mm}^2.$$

$$R_{m(3)450^\circ} = 628,66 \text{ N/mm}^2.$$

La dureté HV (mesurée dans le laboratoire de physique en utilisant un duromètre modèle : Zwick/Roell

$$H_{V_{\text{prut}}} = 204$$

$$H_{V_{300^\circ}} = 211$$

$$H_{V_{450^\circ}} = 196$$

Procédés expérimentaux

Au-dessous vous trouverez les caractéristiques des traitements thermiques

Thermiques concernant cet acier :

- Toutes les éprouvettes ont subi l'opération de trempe à $T = 803^{\circ}\text{C}$ pendant 10 min suivit d'un refroidissement à l'air ;
- La moitié des éprouvettes trempées ont subi l'opération de revenu à $T = 300^{\circ}\text{C}$ et l'autre moitié a été effectuée à $T = 450^{\circ}\text{C}$, suivi d'un refroidissement lent.

Les résultats des essais de traction sont présentés sous forme de courbes (figure 3.2 et 3.1)

3.3 Machine d'essai de fatigue

On distingue plusieurs machines d'essai de fatigue ; selon le mode de sollicitation (flexion plane, flexion rotative, torsion, traction compression, etc.), et selon les facteurs d'influence (température, fatigue sous corrosion, etc.).

Le laboratoire de la résistance des matériaux (RDM) du département de génie mécanique de l'université de M'sila est doté d'une machine d'essai de fatigue en flexion rotative modèle : **GUNT**, de type : **WP 140**, qui a les caractéristiques suivantes :

- courant alternatif : 220 V
- fréquence : 50 Hz
- charge maximale : 500 N
- échelle de graduation : 5 N
- environnement : air ambiant
- température : ambiante

3.3.1 Description de la machine

La machine d'essai de fatigue en flexion rotative **WP 140** est présentée sur la figure 3.5

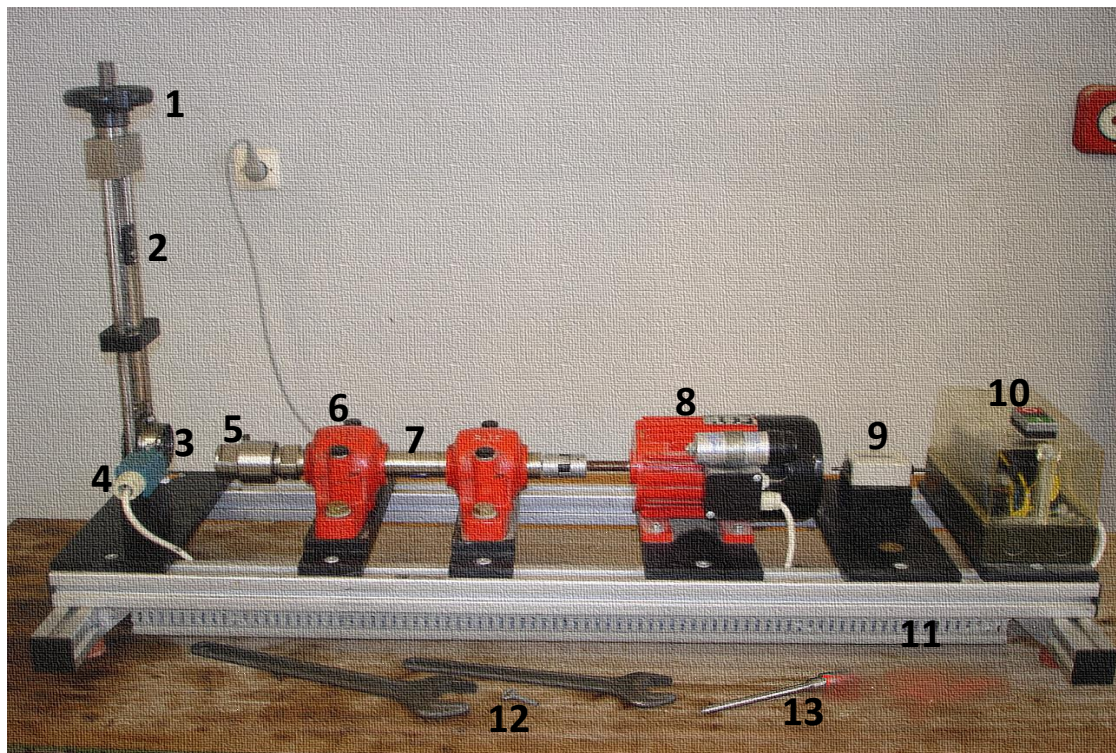


Figure 3.5 La machine d'essai de fatigue **GUNT WP 140**

- 1 Volant
- 2 Chariot transversal gradué
- 3 Roulement
- 4 Fin de course
- 5 Mandrin
- 6 Palier lisse
- 7 Arbre de transmission
- 8 Moteur électrique
- 9 Compteur
- 10 Tableau de commande
- 11 Châssis
- 12 Clés
- 13 éprouvette

3.3.2 Instructions

- A. Connecter la machine d'essai de fatigue à l'alimentation électrique.
- B. Tourner le volant dans le chariot transversal jusqu'au numéro "0" apparaît dans l'échelle des charges.
- C. Soit sûr que l'axe du roulement et celui de l'arbre de transmission sont en alignement.
- D. Insérer l'éprouvette désirée (le tableau 3. 1. donne les dimensions des éprouvettes appartiennent à cette machine).
 - Premièrement, desserrer le mandrin de l'arbre de transmission.
 - Puis, faire introduire la partie cylindrique de l'éprouvette à travers le trou du mandrin.
 - Après, insérer l'extrémité cylindrique de l'éprouvette dans la bague intérieure du roulement, et en fin, insérer l'extrémité conique de l'éprouvette dans le cône dans l'arbre de transmission on serrant bien le mandrin.
- E. Utiliser la clé pour retourner le compteur à "0" (le "0" de la dernière colonne du compteur peut retourner on tournant l'arbre de transmission à la main).
- F. Charger l'extrémité libre de l'éprouvette (sur le roulement) par la charge désirée on tournant le volant.
- G. Allumer la machine.
- H. A la rupture, la fin de course arrête automatiquement la machine, changer l'éprouvette rompue et recommencer les essais.

3.3.3 Eprouvette d'essai

Le choix de l'éprouvette d'essai dépend de l'essai que l'on veut effectuer et de la machine dont on dispose.

3.3.4 Forme

On distingue les éprouvettes parallélépipédiques d'épaisseur constante et à section soit constante, soit variable, des éprouvettes axisymétriques à section circulaire, soit cylindriques à section constante, soit toroïdales à section variable.

Dans tous les cas, on distingue les éprouvettes lisses.

3.3.5 Dimensions

Elles dépendent de la capacité de la machine (charge d'essai maximale : 25% de la capacité de la machine) et de ces caractéristiques (fréquence propre de l'éprouvette supérieure à deux fois la fréquence d'essai).

Le tableau 3.1 représente les types d'éprouvettes qui appartiennent à la machine d'essai de fatigue **WP 140**.

Tableau 3.2 Caractéristiques des éprouvettes de la machine **WP 140**

Eprouvette n°	Rayon R (mm)	Rugosité de la surface R_t (μm)
1	0.5	3
3	2	4
4	2	25

Dans ce travail nous avons choisi l'éprouvette **1** qui à les dimensions données sur le mise en plan figure3.7

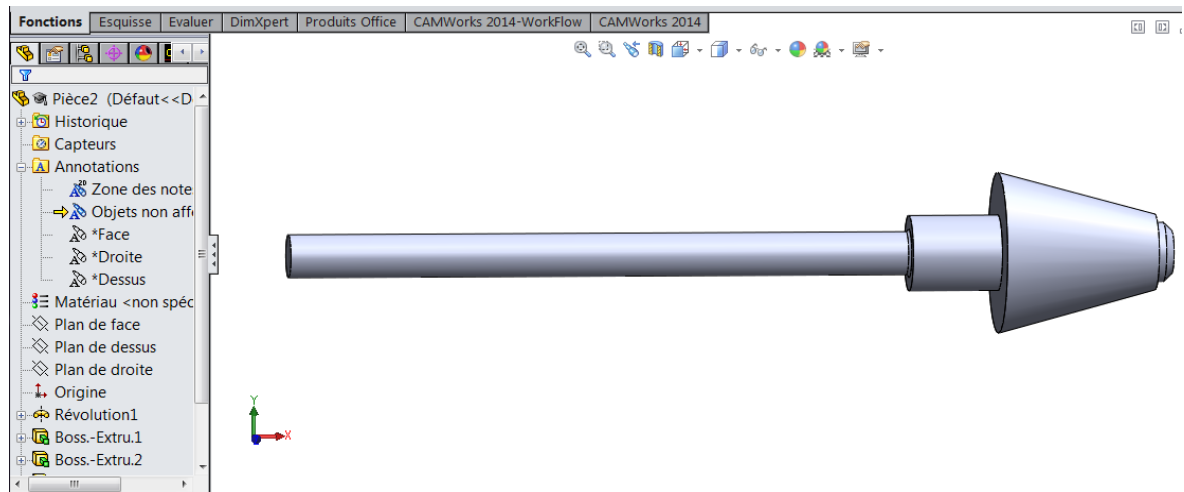


Figure 3.6 Eprouvette d'essai de fatigue réalisée sur solidworks

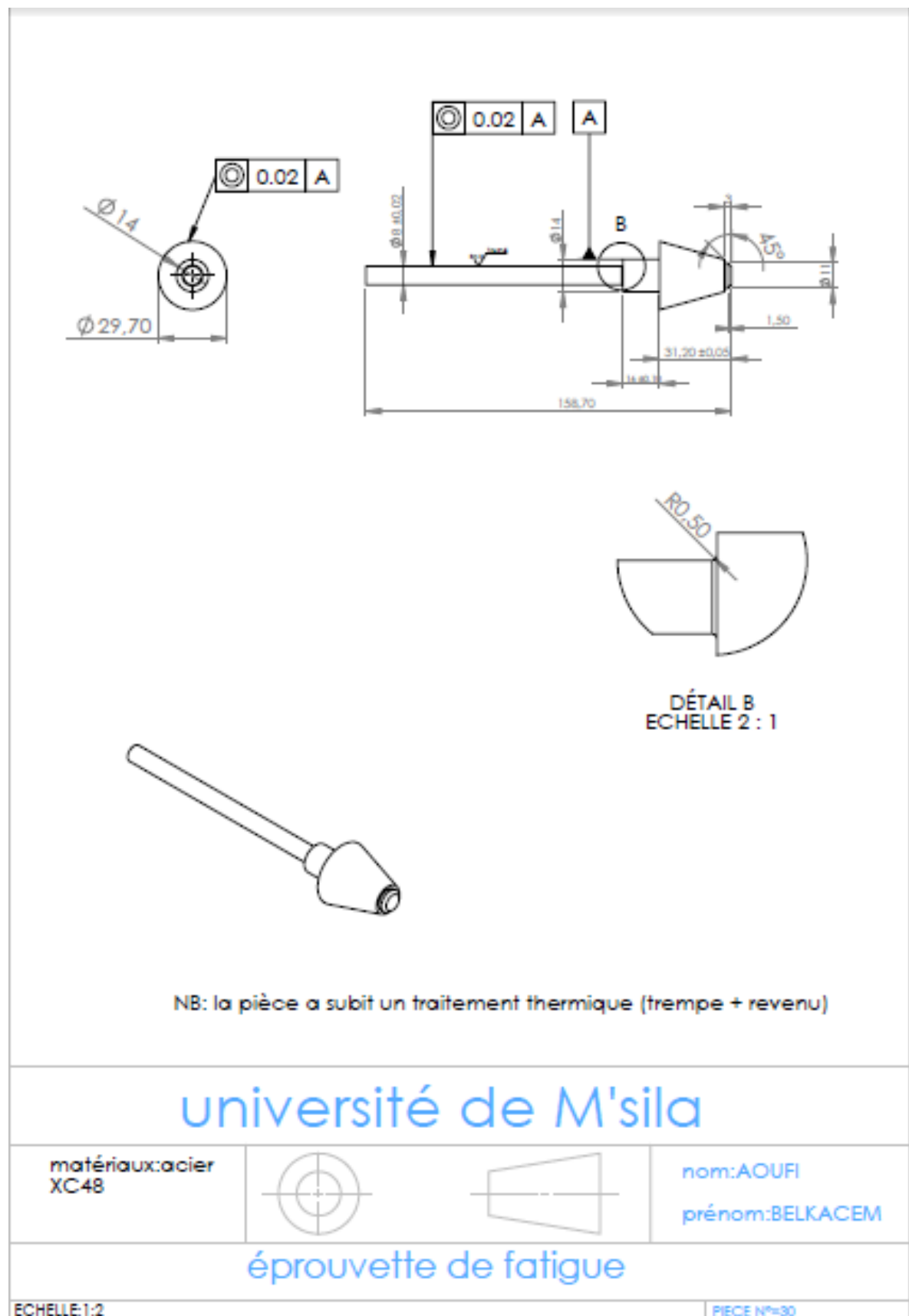


Figure 3.7 mise en plan d'éprouvette d'essai fatigue

3.3.6 Usinage des éprouvettes

Lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques fondamentales d'un métal en fatigue, il est nécessaire de réduire le plus possible l'influence de l'état de surface de l'éprouvette sur le processus de fatigue qui conduira à la rupture.

Pour cette raison, l'état de surface des éprouvettes devra être particulièrement soigné et répétitif pour le même lot d'éprouvette. On aura alors intérêt à privilégier les types d'éprouvettes et les modes d'usinage qui assurent le maximum de régularité et de répétitivité de l'état de surface et qui n'introduisent que des contraintes résiduelles et un écrouissage superficiel négligeable.

La finition des éprouvettes par polissage manuel, même longitudinal, doit donc être évité chaque fois que cela est possible [9]. On utilisera de préférence des éprouvettes cylindriques à profil toroïdal dont la finition sera obtenue par polissage à papier abrasif dans le sens longitudinal.

Un contrôle de la rugosité superficielle après usinage est conseillé. Dans le cas de lots à grand nombre d'éprouvettes, le prélèvement des éprouvettes à contrôler devra être effectué de manière statistique de façon à avoir une valeur moyenne de rugosité représentative du lot et une indication de la dispersion des mesures. Voir Figure 3.7



Figure 3.7 Rugosimètre

Procédés expérimentaux

Dans cette étude nous avons usiné nos éprouvettes dans les ateliers de fabrication mécanique par un tour universelle mode SN40C-50C. Voir figure 3.8



Figure 3.8 tour universelle mode SN40C-50C

3.4 Contrainte maximale de flexion

La contrainte maximale de flexion σ sur la fibre externe se calcule par la formule de Navier.[9]

$$\sigma = \frac{M_f}{M_i}$$

avec : M_f : moment fléchissant par rapport à la section considérée.

$$M_f = F L$$

F : la charge appliquée

L : longueur du bras de levier

et : $M_i = \frac{I}{v}$: 'module de section'

I : moment d'inertie de la section par rapport à l'axe neutre, $I = \frac{\pi D^4}{64}$

v : distance de la fibre externe à la fibre neutre. $v = \frac{D}{2}$

La figure 3.9 montre le point d'application de la charge F sur l'éprouvette 1

Analyse statique d'éprouvette de fatigue sur solidworks voir(Annexe8)



Figure 3.9. Point d'application de la charge F

$$\sigma = \frac{M_f}{M_i}$$

$$M_f = F \times L$$

$$M_i = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$\sigma = \frac{32 \times F \times L}{\pi d^3}$$

$$\sigma = \frac{32 \times F \times 102,5}{3,14 \times 8^3}$$

$$\sigma = 2.F(\text{MPa})$$

3.5 Résultats expérimentaux

Pour déterminer la tenue à la fatigue de l'acier retenu, telle que la limite d'endurance on a utilisé trois lots d'éprouvettes, de 30 éprouvettes au total.

3.5.1 Lot n° : 01

Ce lot est effectué par la méthode de reclassement des données. Nous avons utilisé 8 éprouvettes sur 8 niveaux différents.

Méthode de reclassement des données

- ✓ Matériau : Acier **XC48**
- ✓ Machine d'essai : **WP 140**
- ✓ Mode de sollicitation : flexion rotative (3000 tr/mn)
- ✓ Eprouvette : **1**
- ✓ Essai à la température ambiante

Eprouvette	Contrainte (N/mm ²)	Nombre de cycles	Résultat à 10 ⁶
01	360	36400	X
02	340	20510	X
03	330	34400	X
04	300	81155	X
05	260	33700	X
06	240	541543	X
07	220	2035452	X
08	200	>2.2*10 ⁶	O

O : éprouvette non rompue Tableau 3.3 résultats d'essai de fatigue à l'état brut

x : éprouvette rompue

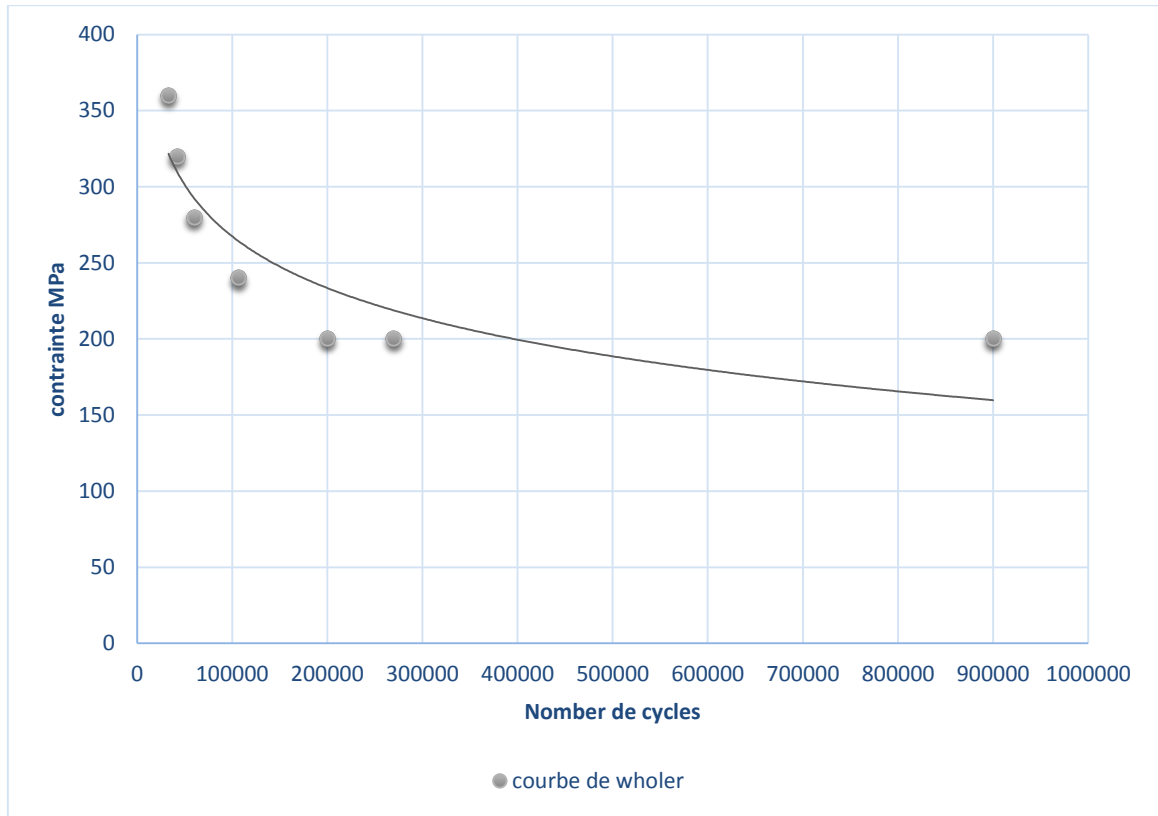


Figure 3.10 Courbe S-N de l'acier XC 48 à l'état brut

3.5.2 Lot n° : 02

Ce lot est effectué par la méthode de reclassement des données. Les éprouvettes à essayer ont été trempées à $T = 803^{\circ}\text{C}$ puis revenus à $T = 300^{\circ}\text{C}$ suivit d'un refroidissement lent.

Méthode de reclassement des données

- ✓ Matériau : Acier **XC48**
- ✓ Machine d'essai : **WP 140**
- ✓ Mode de sollicitation : flexion rotative (3000 tr/mn)
- ✓ Eprouvette : **1**
- ✓ Essai à la température ambiante

Eprouvette	Contrainte (N/mm^2)	Nombre de cycles	Résultat à 10^6
01	360	15226	X
02	340	19880	X
03	330	25620	X
04	300	32345	X
05	260	81929	X
06	240	311029	X
07	220	$2.2 \cdot 10^6$	X
08	200	$3 \cdot 10^6$	O

Tableau 3.4 résultats d'essai de fatigue -revenus à $T = 300^{\circ}\text{C}$

X : éprouvette rompue

O : éprouvette non rompue

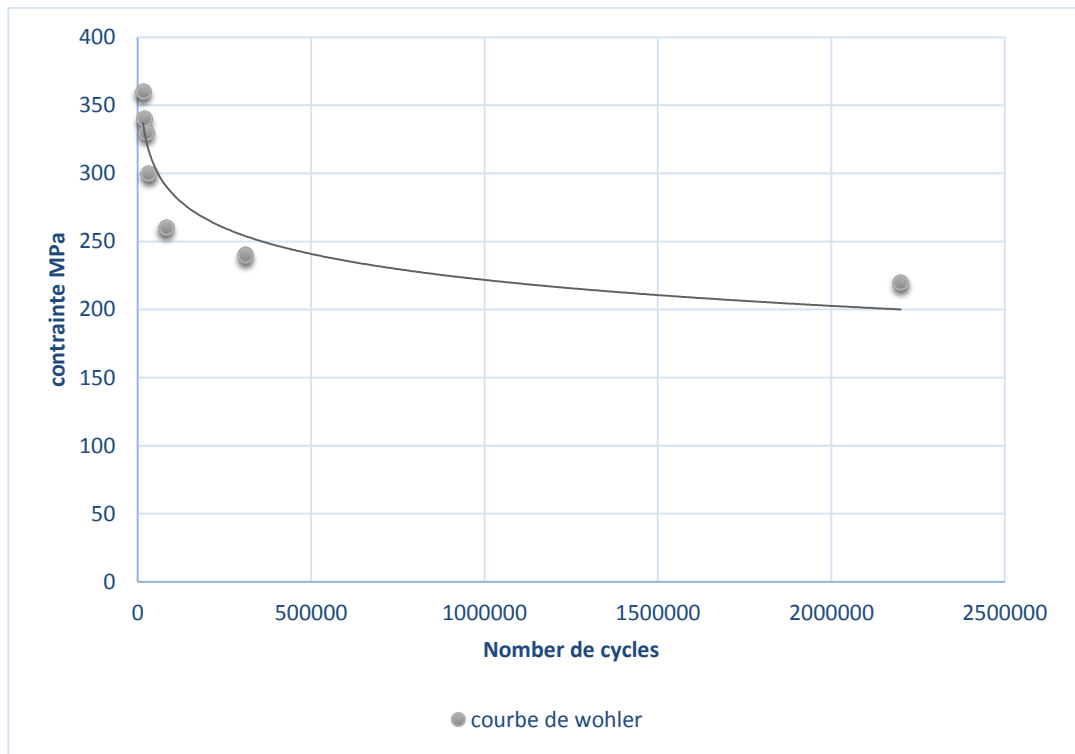


Figure 3.11 Courbe S-N de l'acier XC 48 trempées à $T = 803^{\circ}\text{C}$ puis revenues à $T = 300^{\circ}\text{C}$ suivit d'un refroidissement lent.

3.5.3 Lot n° : 03

Ce lot est effectué par la méthode de reclassement des données. Les éprouvettes à essayer ont été trempées à $T = 803^{\circ}\text{C}$ puis revenus à $T = 450^{\circ}\text{C}$ suivit d'un refroidissement lent.

Méthode de reclassement des données

- ✓ Matériau : Acier **XC48**
- ✓ Machine d'essai : **WP 140**
- ✓ Mode de sollicitation : flexion rotative (3000 tr/mn)
- ✓ Eprouvette :
- ✓ Essai à la température ambiante

Eprouvette	Contrainte (N/mm^2)	Nombre de cycles	Résultat à 10^6
01	360	33000	X
02	340	42031	X
03	330	60000	X
04	300	106862	X
05	260	200000	X
06	240	270000	X
07	220	900000	X
08	160	$>2.2 \cdot 10^6$	O

Tableau 3.4 résultats d'essai de fatigue -revenus à $T = 300^{\circ}\text{C}$

x : éprouvette rompue

O : éprouvette non rompue

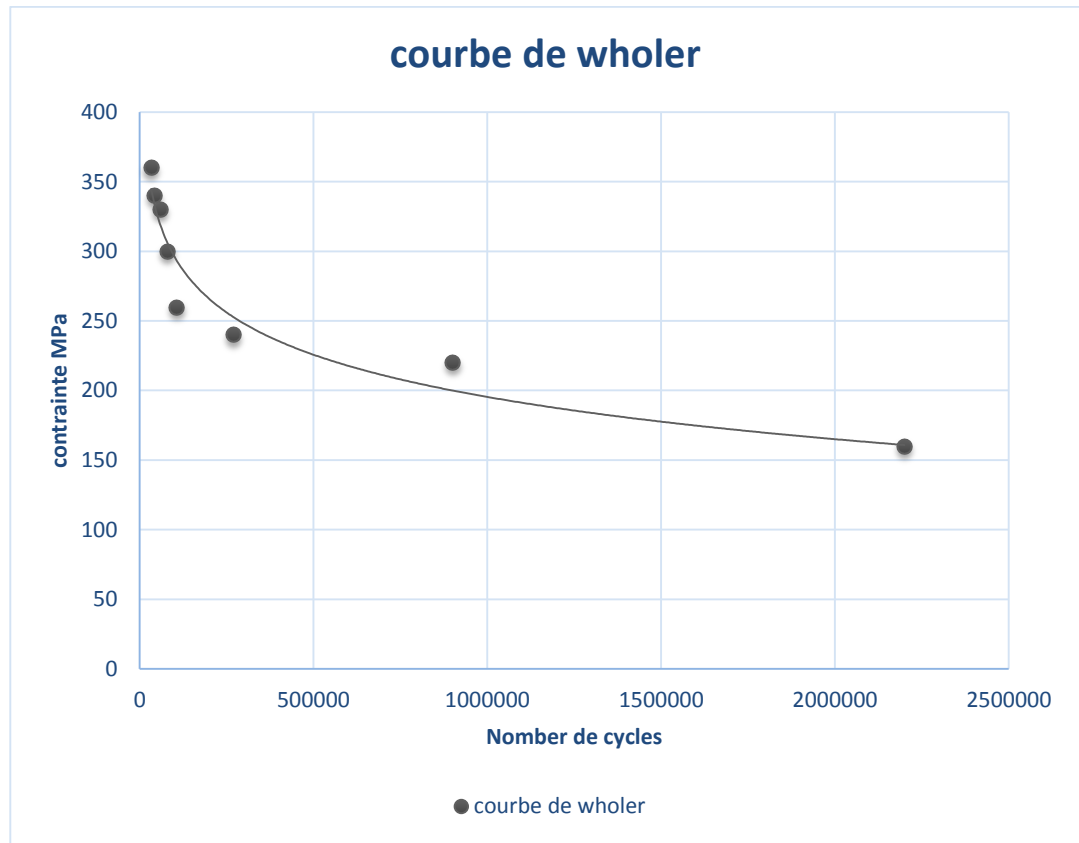


Figure 3.12 Courbe S-N de l'acier XC trempées à $T = 803^{\circ}\text{C}$ puis revenus à $T = 450^{\circ}\text{C}$ suivit d'un refroidissement lent.

3.6 Etude micrographique

Un examen microscopique (microscope optique modèle : **Leitz WETZLAR**) montre que la structure est ferrito-perlitique ; perlite lamellaire.

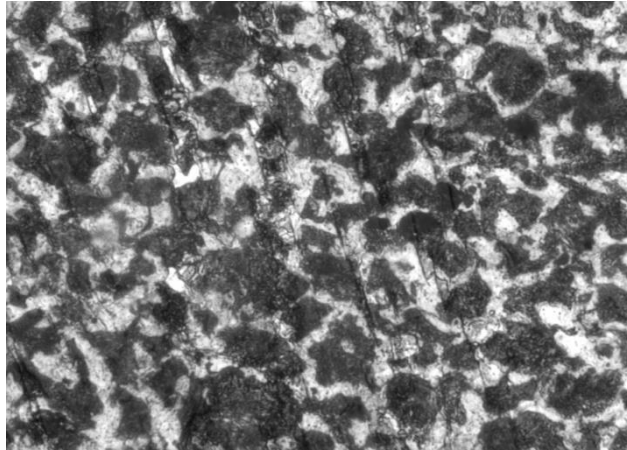


Figure 3.13 Structure métallographique de l'acier **XC48** [8]

La présence d'une zone lisse périphérique et d'une zone centrale grenue est caractéristique des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative.

La présence de nombreuses lignes radiales sur tout le pourtour de la cassure témoigne de la multitude d'amorçages superficiels [9].

La position centrale de la rupture finale est liée aux fortes concentrations de contraintes qui affectent la pièce au niveau du congé, mais sa faible étendue indique que la pièce est peu chargée.

L'examen de la zone d'amorçage permet enfin de constater la présence de nombreuses microfissures à la surface du congé. Ces défauts, provoqués lors de l'usinage (sans doute par le «broutage» de l'outil), sont à l'origine de la rupture qui s'est ensuite développée sous l'effet des sollicitations normale de service (figure 3.14)

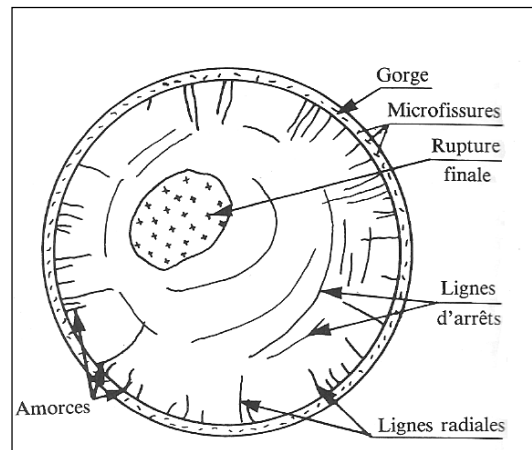


Figure 3.14 Caractéristiques des ruptures développées en fatigue sous sollicitation de flexion rotative [9]

Un tableau récapitulatif des faciès de rupture est schématisé en **annexe : 1**

Et voici quelques faciès de rupture observés lors des essais de fatigue :

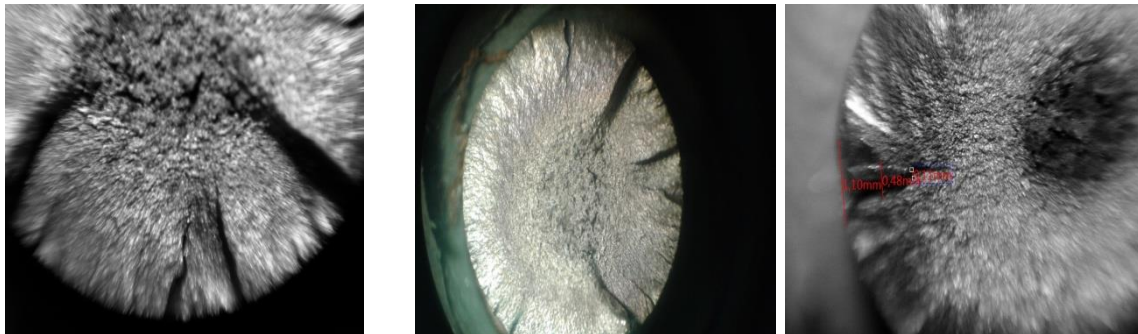


Figure 3.15 Faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 360 MPa après 36400 cycles (acier brut)

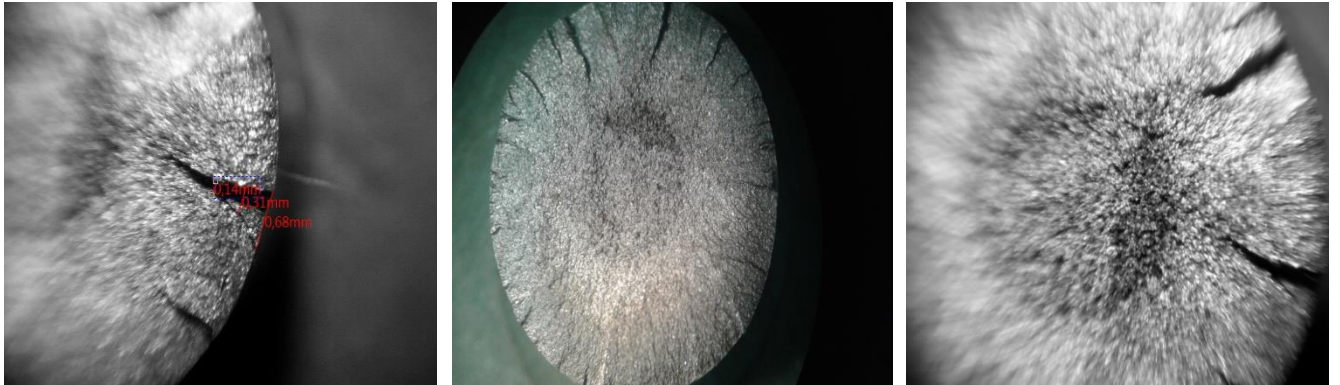


Figure 3.16 Faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 360 MPa après 33000 cycles de l'acier XC 48 trempé et revenu à 300°C.

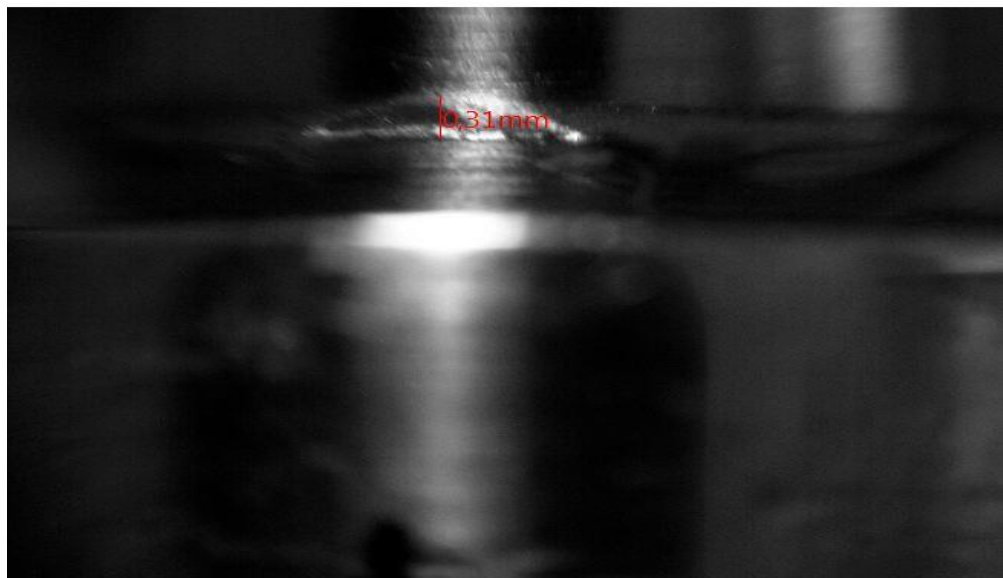


Figure 3.17 Faciès d'arrachement de matière d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 300 MPa après 12000 cycles

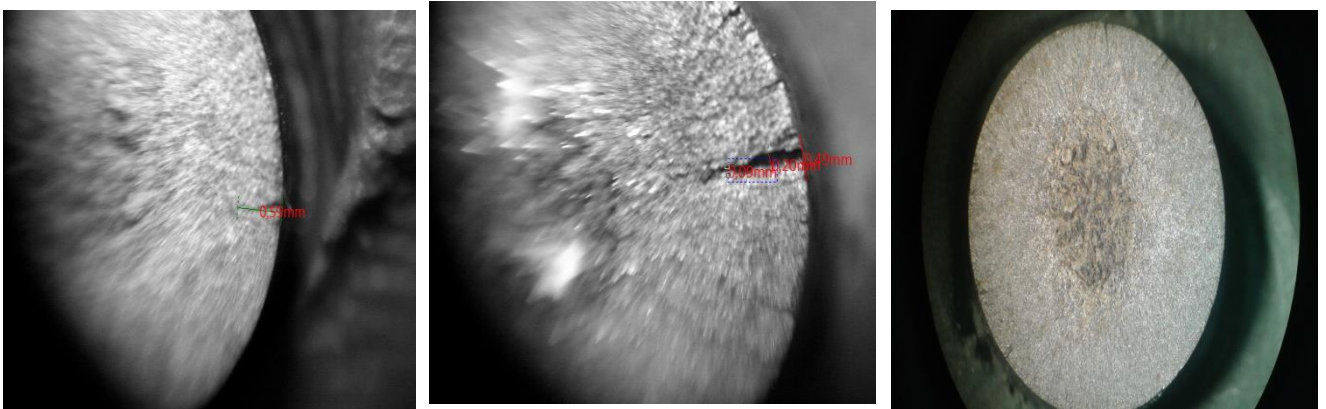


Figure 3.18 Faciès de rupture d'une éprouvette d'essai de fatigue en flexion rotative sous une charge de 200 MPa après 2000000 cycles de l'acier XC 48 trempé et revenu à 450°C.

3.7 Interprétation des résultats

L'acier utilisé est un acier au carbone non allié. Comme il a été mentionné en haut, Cet acier s'emploie dans la construction mécanique après normalisation, amélioration pour une variété de pièces (vilebrequins, bielles, arbre à cames, pignons,...).

Ces pièces travaillent souvent en rotation ou dans des conditions de vibration. Donc, ils sont soumis au phénomène de fatigue.

Pour comprendre ce phénomène, on a étudié le comportement de cet acier à la fatigue cyclique. Notre objectif est d'étudier le comportement de cet acier à la fatigue après trempe et revenu. Cette étude nous oblige d'étudier le comportement de cet acier à l'état brut.

3.7.1 Comportement de l'acier C45 à la traction

Pour avoir une idée sur la résistance à la traction et en particulier la limite élastique de cet acier on a réalisé des essais de traction.

Il est bien clair sur la courbe de traction (fig. 3.2), que le domaine élastique et le domaine plastique sont bien distinctes. Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la limite élastique de cet acier après trempe et revenu sont différentes. Ces résultats nous ont permis d'avoir une idée sur la réaction de l'acier qui va subir l'essai de fatigue. En effet, il a été mentionné dans la partie bibliographique que l'acier travaillant en rotation sous une charge variable ou fixe peut échouer même à une inférieure à la limite élastique. Cependant, il est nécessaire de connaître les valeurs de la limite élastique de l'acier, c'est ce qui a été fait.

3.7.2 Comportement de l'acier C45 à la fatigue

Les résultats des différents essais de fatigue sont montrés sur les figures (3.10, 3.11, 3.12), qui montrent l'évolution des charges appliquées en fonction du nombre de cycles (en d'autres termes, la courbe de Wöhler). Il apparaît que la limite d'endurance de cet acier sous différentes conditions commence après à peu près $2 \cdot 10^6$ cycles. Il est noté que dans le cas de l'acier à l'état brut (sans traitement) et l'acier trempé puis revenu à la température 300 °C, que l'allure de la courbe de Wöhler est presque la même sauf que la durée de vie des éprouvettes sous les mêmes charges est plus importante dans le cas des éprouvettes trempées et revenues comparée à la durée de vie des éprouvettes non traitées. Cela peut être expliqué par le fait que le revenu aux basses températures (300°C), la martensite commence à se transformer, et note le début retour à l'état stable. On sait bien que la structure martensitique est une structure instable est très dure, ce qui est remarqué dans le domaine où on utilise des

charges maximales. Après revenu à 450 °C, on peut dire l'acier revient à l'état stable, et donc retour à la formation de la cémentite Fe_3C , dans ces conditions l'acier devient plus ductile (diminution de la résistance maximale et la limite élastique). Dans le domaine des charges maximales, on notera presque le même comportement que l'acier brut et l'acier revenu à 300 °C, sauf les nombre de cycles augmente en fonction de la charge appliquée.

En ce qui concerne le domaine d'endurance, il est noté que la limite d'endurance commence après 2×10^6 cycles pour les trois cas. Dans le cas des éprouvettes à l'état brut et les éprouvettes trempées et revenues à 300 °C, il a été constaté que la limite d'endurance est presque la même, ce qui est un peu contradictoire avec le fait que lorsque l'acier est revenu aux températures, il est plus résistant et plus dur que l'acier non traité. Ceci nous mène à dire que l'acier utilisé est peut être semi traité, c'est-à-dire qu'il n'est pas à son état original. Par contre, l'acier trempé et revenu à 450°C montre que sa limite d'endurance commence à des charges inférieures à 200MPa. Comme on l'a mentionné en haut de ce paragraphe, l'acier présente un état stable, et retour aux phases ductiles. Cette propriété conduit la diminution de la limite élastique, et donc diminution de la limite d'endurance de l'acier. Malgré la petite différence entre les courbes de Wöhler dans les différentes conditions de traitement, il est à noter que l'acier trempé et revenu à 450 °C présente une limite d'endurance plus basse. D'autres paramètres peuvent influencer sur le comportement à la fatigue de notre acier, on peut citer l'état de surface, la rugosité, et l'environnement.

3.7.3 Étude micrographique

La présence de nombreuses lignes radiales sur tout le pourtour de la cassure témoigne de la multitude d'amorçages superficiels [9].

La position centrale de la rupture finale est liée aux fortes concentrations de contraintes qui affectent la pièce au niveau du congé, mais sa faible étendue indique que la pièce est peu chargée. L'examen de la zone d'amorçage permet enfin de constater la présence de nombreuses microfissures à la surface du congé. Ces défauts, provoqués lors de l'usinage (sans doute par le «broutage» de l'outil), sont à l'origine de la rupture qui s'est ensuite développée sous l'effet des sollicitations normale de service (figure 3.14)

Conclusion

Ce travail, a été consacré à une étude expérimentale sur le comportement en fatigue en flexion rotative d'un acier C45 (**XC48**) après traitement thermique.

Cette étude a pour but de connaître les caractéristiques de fatigue en flexion rotative de cet acier avant et après traitements thermiques telle que la limite fatigue.

Pour cela, nous avons réalisé des essais dynamiques sur des éprouvettes cylindriques lisses.

Après les essais expérimentaux, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Il apparait que la limite d'endurance de cet acier sous différentes conditions commence après à peu près 2.10^6 cycles.
- la partie oligocyclique parait semblable dans le cas où l'acier est à l'état brut ou revenu à 300°C. Après revenu à 300°C, début de transformation de la martensite, l'acier possède une dureté plus élevée.
- Dans le domaine des charges maximales, on notera presque le même comportement que l'acier brut et l'acier revenu à 300 °C, sauf les nombre de cycles augmente en fonction de la charge appliquée.
- L'acier trempé et revenu à 450°C montre une limite d'endurance qui commence à des charges inférieures à 200MPa-
- L'état de surface, la rugosité, et l'environnement influent sur la limite d'endurance.
- Les défauts, provoqués lors de l'usinage (sans doute par le «broutage» de l'outil), sont des paramètres qui peuvent être à l'origine de la rupture des éprouvettes.

Durant cette étude, plusieurs solutions ont été proposées pour éliminer ou minimiser l'influence de ces facteurs sur la limite de fatigue. Nous recommandons au concepteur de les prendre en considération, citons :

- le choix de traitement de matériau à utiliser lors de la conception de la pièce,
- la propreté du matériau augmente l'endurance,
- l'état de surface a une influence importante sur la limite d'endurance (une pièce présentant un état de surface fin est plus endurante que la même pièce avec un état de surface grossier),
- diminution de la température du milieu de travail de la pièce,
- éviter un environnement agressif (air humide par exemple).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Métallurgie mécanique du microscopique au macroscopique ; science des matériaux niveau B & C 2ème édition
- [2] « Essential of materials science and engineering », Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, D.K. Bhattacharya, Cengage Learning (2010); pp 379-383
- [3] A. BRAND, J-F. FLAVENOT, R. GREGOIRE et C. TOURNIER, *Données technologiques sur la fatigue*, CETIM 3^e édition (1992).
- [4] Mesures thermographiques de champs de dissipation accompagnant de fatigue à grand nombre de cycles des aciers bruno Berthle
- [5] fatigue de matériaux book january 2016
- [6] G.E. Dieter, « Mechanical metallurgy », McGraw-Hill, (1984),
- [7] la fatigue des matériaux et de structures », CLAUDE BATHIAS. JEAN-PAUL BAILON.
- [8] Métaux : corrosion-industries volume 32 », Louise Delville. publié 1957
- [9] G. BARATTO, J-J. GUERIN, J. MONGIS, C. TOURNIER et A. VIEU, *Analyse morphologique des défaillances d'organe de machines*, CETIM (1996).
- [10] Thomas delahay (2004) Développement d'une méthode probabiliste de calcul en fatigue multiaxiale prenant en compte la répartition volumique des contraintes. Thèse de doctorat l'ensam cer de bordeaux.
- [11] Des matériaux , JP Bailon , JM Dorlot

ANNEXE

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des faciès de rupture en fatigue

Type de sollicitations	Contraintes nom. élevées			Contraintes nom. faibles		
	Concentration de contraintes					
	nulle	faible	élevée	nulle	faible	élevée
Traction-traction ou Traction-compression						
Flexion plane ondulée						
Flexion plane alternée						
Flexion rotative						
Torsion						

Annexe 2 Composition chimique de l'acier XC48

Thermo SCIENTIFIC
Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XLN-62240

Reading No	299
Mode	Precious Metals
Time	2017-01-24 03:22
Duration	32.00
Units	%
Sigma Value	2
Sequence	Final
Alloy1	LA-1215 : 0.08
Alloy2	No Match : *2.84
Flags	
SAMPLE	Ep 17
HEAT	
LOT	
BATCH	
MISC	
NOTE	

	%	#	Error
In	< LOD	?	0.006
Cd	< LOD	?	0.006
Ag	< LOD	?	0.010
Pd	< LOD	?	0.005
Rh	< LOD	?	0.004
Su	< LOD	?	0.002
Mo	0.043	*	0.002
Nb	< LOD	?	0.002
Pb	< LOD	?	0.011
Au	< LOD	?	0.009
Pt	< LOD	?	0.012
Ir	< LOD	?	0.013
Ge	< LOD	?	0.011
Zn	< LOD	?	0.018
Cu	0.175	*	0.026
Ni	0.151	*	0.120
Co	< LOD	?	0.079
Fe	98.654	*	0.030
Mn	0.759	*	0.012
Cr	0.164	*	0.022
Ti	0.046	*	0.004
Sn	0.009	*	

Supervised By:

Annexe 3 Montage d'éprouvette pendant l'usinage



Annexe 4 machines de traction



Annexe 5 les éprouvette de fatigue avant TT



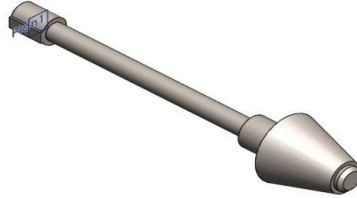
Annexe 6 four utilisée dans le traitement d'éprouvette



Annexe7 éprouvette après TT



Annexe8 Analyse statique d'éprouvette de fatigue sur solidworks



Description

Simulation de éprouvette de fatigue

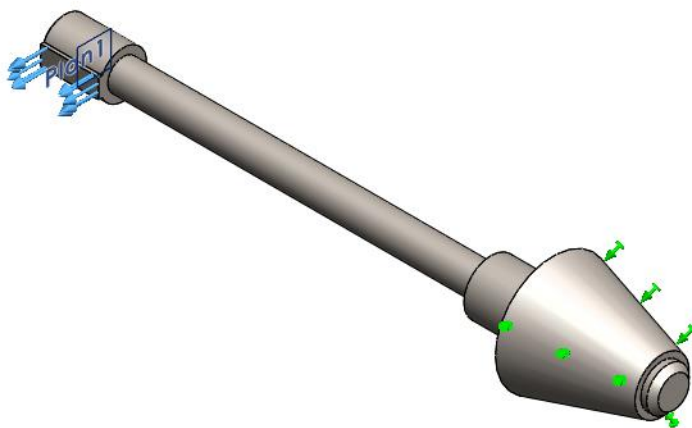
Date: mercredi 3 mai 2017:
Nom de l'étude:BELKACEM AOUFI
concepteur: Simulation Xpress
Study
Type d'analyse: Analyse statique

Sommaire

Description	81
Hypothèses	82
Informations sur le modèle	82
Propriétés du matériau	83
Actions extérieures	83
Informations sur le maillage	84
Résultats de l'étude	85
Conclusion	

Hypothèses

Informations sur le modèle



Nom du modèle: Pièce21
Configuration actuelle: Défaut

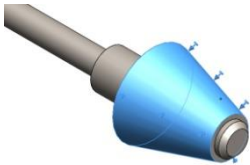
Corps volumiques

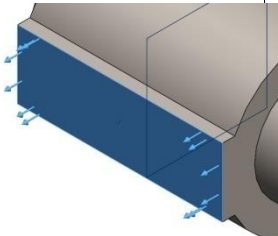
Nom du document et référence	Traité comme	Propriétés volumétriques	Chemin/Date de modification du document
Boss.-Extru.6 	Corps volumique	Masse:0.159592 kg Volume:2.03302e-005 m ³ Masse volumique:7850 kg/m ³ Poids:1.564 N	C:\Users\MAISON XP\Desktop\Nouveau dossier\Pièce21.SLDPRT May 03 18:09:56 2017

Propriétés du matériau

Référence du modèle	Propriétés	Composants
	Nom: AISI 4130 Acier recuit à 865C Type de modèle: Linéaire élastique isotropique Critère de ruine par défaut: Contrainte de von Mises max. Limite d'élasticité: 4.6e+008 N/m² Limite de traction: 5.6e+008 N/m²	Corps volumique 1(Boss.-Extru.6)(Pièce2)

Actions extérieures

Nom du déplacement imposé	Image du déplacement imposé	Détails du déplacement imposé
Fixe-1		Entités: 1 face(s) Type: Géométrie fixe

Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement
Force-1		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: -180 N

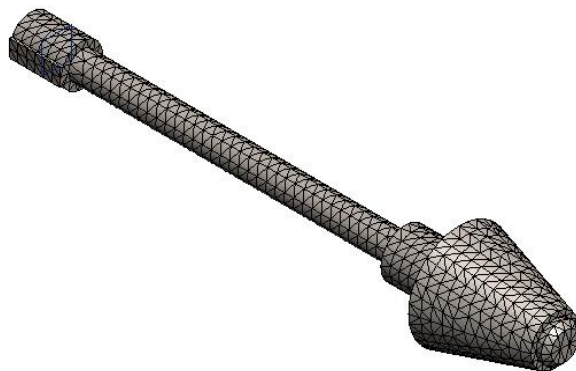
Informations sur le maillage

Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage basé sur la courbure
Points de Jacobien	4 Points
Taille d'élément maximum	0 mm
Taille d'élément minimum	0 mm
Qualité de maillage	Haute

Informations sur le maillage - Détails

Nombre total de noeuds	12102
Nombre total d'éléments	7495
Aspect ratio maximum	7.9396
% d'éléments ayant un aspect ratio < 3	98.5
% d'éléments ayant un aspect ratio > 10	0
% d'éléments distordus (Jacobian)	0
Durée de création du maillage (hh:mm:ss):	00:00:07
Nom de l'ordinateur:	MAISONXP-PC

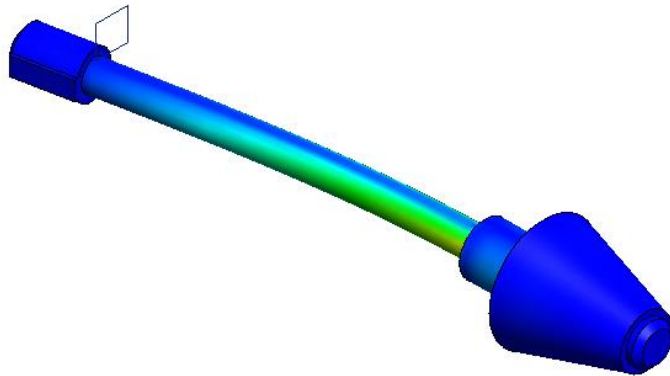
Nom du modèle: Pièce21
Nom de l'étude: SimulationXpress Study(-Défaut-)
Type de maillage: Maillage volumique



Résultats de l'étude

Nom	Type	Min	Max
Stress	VON: contrainte de von Mises	972.98 N/m ² Noeud: 6327	5.02848e+008 N/m ² Noeud: 11374

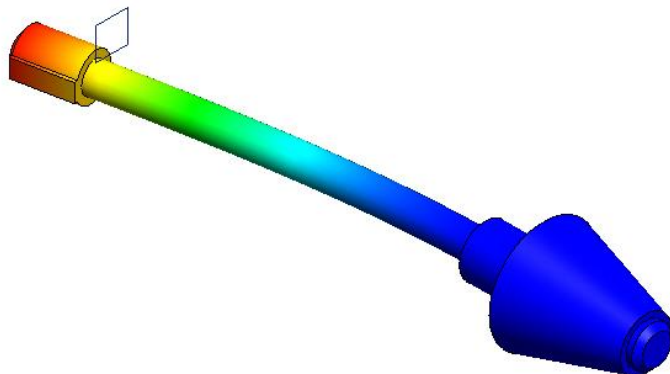
Nom du modèle: Pièce21
Nom de l'étude: SimulationXpress Study(-Défaut-)
Type de tracé: Analyse statique contrainte nodale Stress
Echelle de déformation: 8.14537



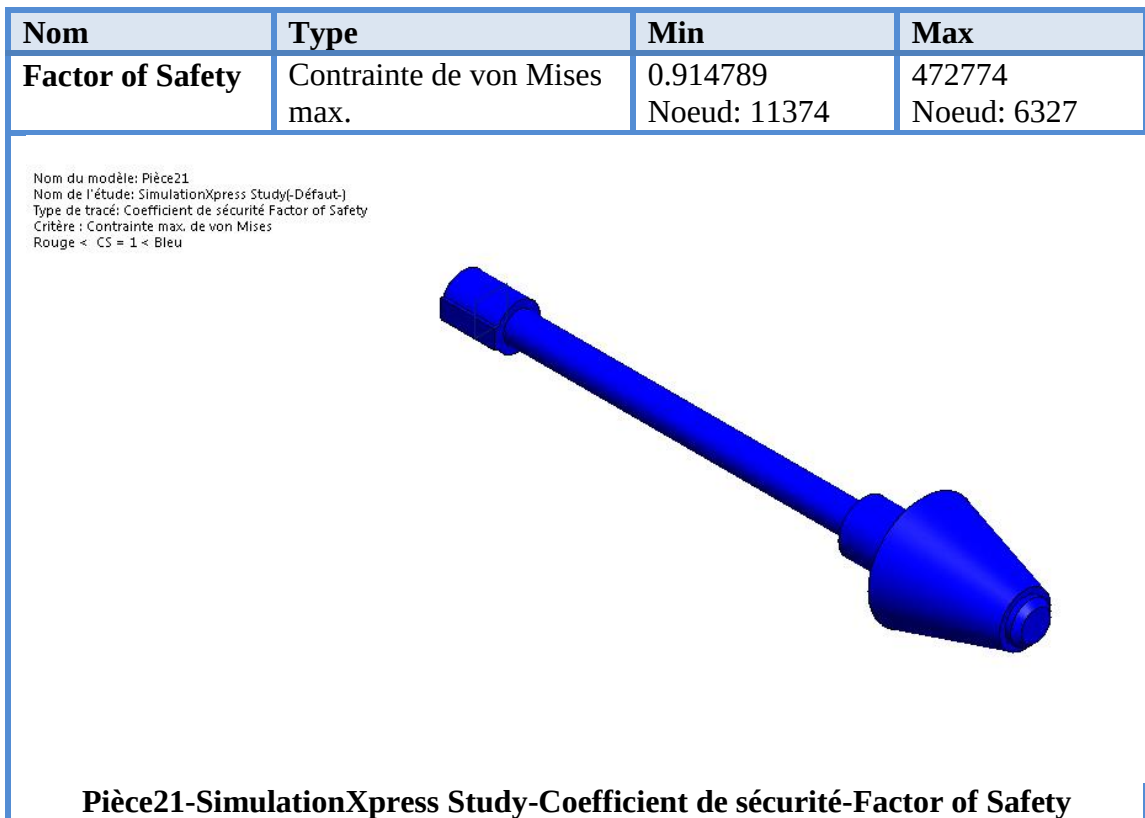
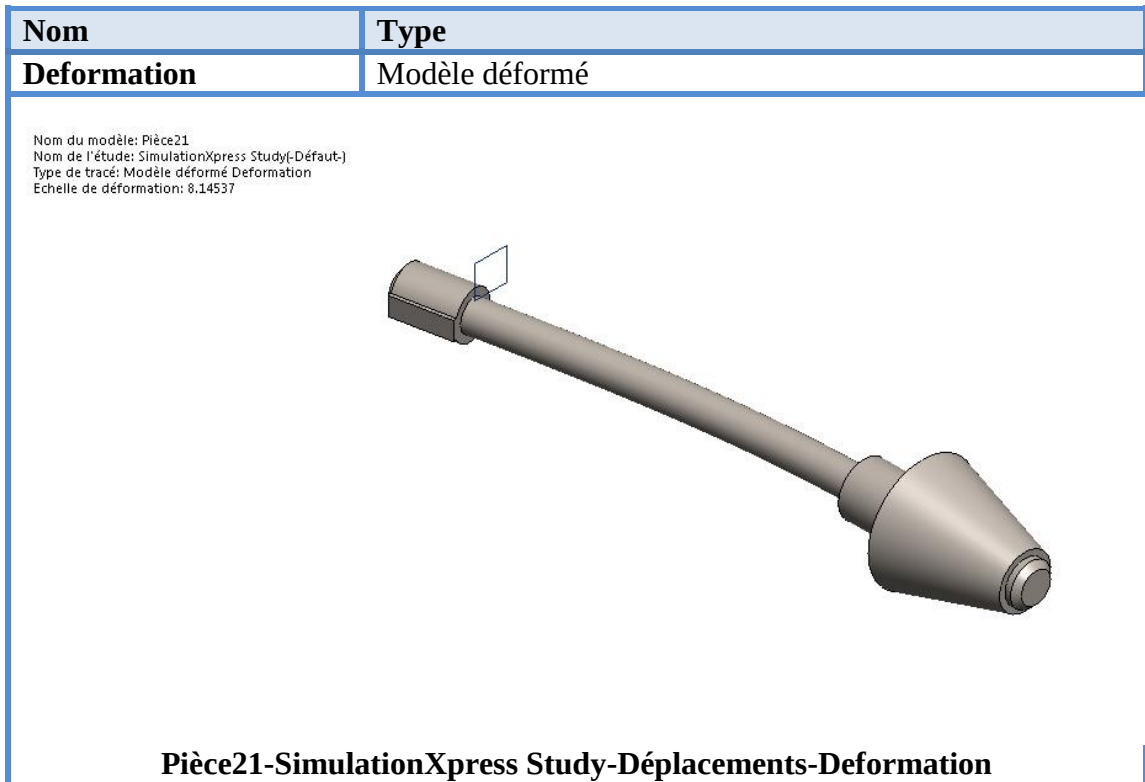
Pièce21-SimulationXpress Study-Contraintes-Stress

Nom	Type	Min	Max
Displacement	URES: Déplacement résultant	0 mm Noeud: 215	1.95077 mm Noeud: 3

Nom du modèle: Pièce21
Nom de l'étude: SimulationXpress Study(-Défaut-)
Type de tracé: Déplacement statique Displacement
Echelle de déformation: 8.14537



éprouvette-SimulationXpress Study-Déplacements-Displacement



Conclusion : le but de cette simulation est de savoir la concentration des contraintes ou niveau de l'éprouvette due flexion appliqués statiquement.

ملخص:

لتحديد اهم الخصائص التي تتميز بها المادة(المعدن) وقبل كل استعمال يجب علينا اجراء فحص شامل لطبيعة استعماله وتحديد خصائصه الميكانيكية المتمثلة في الليونة والصلابة وهذا بتعرضها الي تجربة الكلال(التعب) هو مصطلح لخاصية من الخواص الميكانيكية للمواد وهو أكبر اجهاد متكرر يمكن التأثير به على المادة من غير ان يحدث لها انكسار(انهيار).

وبحثنا يقوم على تعريض عينات اسطوانية الشكل من الصلب (XC48) الى تجربة الكلال (التعب). ويجري هذا الاختبار على عدد من العينات المتشابهة التي يناسب شكلها آلة الاختبار التي بدورها تخضع الي اجهاد متكرر مع تعيين عدد الدورات في الحالة الخام وبعد اجراء معالجة حرارية المتمثلة في التصليد والمراجعة. ويبدو ان حد التحمل لهذا الصلب في ظل الظروف المختلفة يبدأ بعد 2.10^6 دورة

نتائج سمحت لنا ان نستنتج دور المعالجات الحرارية على مقاومة التعب الدوري لهذا الصلب
كلمات البحث: التعب الدوري , اجهاد حد الاحتمال , انحناء دوراني , استمرار البقاء

Résumé

Pour déterminer les caractéristiques les plus importantes que le matériau doit posséder, on doit tout d'abord faire une analyse globale sur son utilisation. Le matériau doit-il être rigide ou ductile ? Sera-t-il soumis à des applications répétées sous des charges élevées ? Une fois que nous avons déterminé les propriétés nécessaires, nous pouvons sélectionner le matériau approprié.

Le présent mémoire, a pour objectif d'étudier le comportement d'un acier au carbone de nuance C45 (XC48), à la fatigue cyclique. Ce phénomène est rencontré dans beaucoup de dispositifs ou pièces qui travaillent en flexion rotative ou en vibration.

Les essais de fatigue sur des éprouvettes lisse en acier de formes cylindriques ont été réalisés sur l'acier à l'état tel que reçu et après trempe et revenu.

Il apparait que la limite d'endurance de cet acier sous différentes conditions commence après à peu près 2.10^6 cycles. Cela est vrai pour les différents cas étudiés.

Les résultats obtenus nous ont permis de connaître le rôle des traitements thermiques sur la résistance à la fatigue cyclique de cet acier.

Mots clés : Fatigue, flexion rotative, endurance, durée de vie.